

Riiko Schamarin

Kehäradan haitta-ainealueen betonielementti-rakenteinen tunneli

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

25.4.2013

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Riiko Schamarin Kehäradan haitta-ainealueen betonielementtirakenteinen tunneli 46 sivua 25.4.2013
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaajat	Osastopäällikkö Magnus Långstedt Projektipäällikkö Metodi Kaydamov Lehtori Timo Leppänen
<p>Insinöörityössä tutkittiin Kehäradan haitta-ainealueen betonielementtirakenteista tunnelia. Työssä selvitettiin betonielementtirakenteisen tunnelin suunnittelussa huomioitavia tekijöitä, elementtirakenteiseen tunneliin liittyviä ongelmia ja ongelmien ratkaisuja. Lisäksi tutkittiin betonielementtirakenteen valinnan perusteita, elementeille ja liitoksille asetettuja vaatimuksia sekä asennuksen vaikutusta suunnitteluun. Työ tehtiin Pöyry Finland Oy:lle, joka toimii Kehäradan tunneliosuuden kokonaissuunnittelijana.</p> <p>Työssä tutustuttiin elementtitunnelin suunnittelun eri vaiheisiin, kohteen toteutuspiirustuksiin ja muuhun suunnittelumateriaaliin. Lisäksi haastateltiin rakenne- ja elementtisuunnittelijoita sekä kohteen vastaavia työnjohtajia.</p> <p>Työssä todettiin, että elementtitunnelia suunniteltaessa tulee huomioida etenkin radan geometrian vaikutus, rakenteista johtuvat ongelmat, rakenteiden yhteensovittaminen, asennusolosuhteet sekä elementtien kuljetus ja nosto. Lisäksi työssä huomioitiin haitta-aineen suojarakenteen vaikutusta suunnitteluun ja asennukseen.</p> <p>Työn tuloksena todettiin, että elementtirakenteinen tunneli on huomattavasti normaalia junatunnelia hitaampi ja vaikeampi rakenne suunnitella. Elementtien kuljetus ja nosto vaatii tarkemman tilankäyttösuunnitelman. Elementtiasennuksille tulee tehdä tarkka asennussuunnitelma. Asennussuunnitelmassa kerrotaan elementtien ja liitosten tarkka kuljetus-, nosto- ja asennusjärjestys. Työssä todettiin myös, miten radan geometria ja eri rakenteet tulee huomioida elementtejä ja liitoksia suunniteltaessa. Niiden vaikutus tulee huomioida elementtien ja liitosten asennustoleransseissa. Lisäksi analysoitiin mittausten tärkeyttä elementtirakenteista tunnelia suunniteltaessa ja asennettaessa.</p>	
Avainsanat	Kehärata, haitta-aine, haitta-ainealue, betonielementti

Author Title Number of Pages Date	Riiko Schamarin Prefabricated concrete tunnel in contaminant area of Ring Rail Line 46 pages 25 April 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructors	Magnus Långstedt, Department Manager Metodi Kaydamov, Project Manager Timo Leppänen, Senior Lecturer
<p>In this thesis a prefabricated concrete tunnel in the contaminant area of Ring Rail Line was investigated. The thesis clarified factors to consider in the design of prefabricated concrete tunnels, problems of prefabricated concrete tunnels and solutions to problems. Also, for choosing the suitable of the prefabricated concrete, requirements of the elements and fittings and also the impact of the installation on the designing were investigated. The thesis was done for Pöyry Finland Oy. Pöyry Finland Oy is the overall designer of the tunnel part of the Ring Rail Line.</p> <p>In this thesis, the various stages of the designing of the prefabricated concrete tunnel and the installation drawings and other installation material of the contaminant area were familiarized with. Also, the designers of the structures and elements and the foremen at the construction site were interviewed.</p> <p>In this thesis it was found that in the designing of a prefabricated concrete tunnel, attention should be especially paid to the effect of the rail geometry, problems arising from structures, combinations of the different kind of structures, installation conditions and transporting and lifting of elements. Also, attention was paid to how the membrane of the contaminant influences the designing and installation.</p> <p>As a result of this thesis it was discovered that a prefabricated concrete tunnel is a much slower and difficult structure to design than a normal tunnel. Transporting and lifting the elements needs a more detailed plan for the use of space. For the installation of the elements, a detailed plan must be made. The plan of installation explains the exact sequence of transporting and lifting the elements. In this thesis it was also found how the rail geometry and the different structures must be taken account in designing the elements and fittings. The impact must be considered in installation tolerances of elements and fittings. Also, the importance of measurements in designing and installation of prefabricated concrete tunnel were analyzed.</p>	
Keywords	Ring Rail Line, contaminant, contaminanted area, prefabricated concrete element

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Betonielementtirakenne	3
2.1	Elementtirakenteelle asetetut vaatimukset	3
2.2	Elementtirakenteinen tunneli	5
2.3	Elementti	11
3	Liitokset	13
3.1	Liitoksille asetetut vaatimukset	13
3.2	Liitoskohtien kuvaus	16
3.3	Liitosten rakenteellinen toiminta	19
4	Asennus	20
4.1	Asennukseen liittyvät ongelmat	20
4.1.1	Radan geometria	20
4.1.2	Rakenteista johtuvat ongelmat	21
4.1.3	Rakenteiden yhteensovittaminen	22
4.1.4	Elementtien asennusolosuhteet	23
4.1.5	Elementtien ja suojamembraanin asennuksen yhdistäminen	24
4.1.6	Elementtien kuljetus ja nosto	27
4.2	Ongelmien ratkaisut	30
4.2.1	Radan geometria	30
4.2.2	Rakenteellisten ongelmien ratkaisu	31
4.2.3	Rakenteiden yhteensovittaminen	32
4.2.4	Elementtien asennusolosuhteet	34
4.2.5	Elementtien ja suojamembraanin asennuksen yhdistäminen	37
4.2.6	Elementtien kuljetus ja nosto	39
4.2.7	Toteutusvaiheen ongelmien ratkaisu	42
5	Asennuksen vaikutus elementtien suunnitteluun	43
6	Tulokset	44
7	Yhteenveto	45
	Lähteet	47

Alkusanat

Tämä insinöörityö tehtiin Pöyry Finland Oy:lle. Haluan kiittää Pöyry Finland Oy: tä mielenkiintoisesta insinöörityö aiheesta ja yrityksen ohjaajia osastopäällikkö Magnus Långstedtiä ja projektipäällikkö Metodi Kaydamovia. Haluan myös kiittää työtovereitani ja kaikkia työssä mukana olleita. Lisäksi halua kiittää koulun valvojaopettajaa lehtori Timo Leppästä.

Helsinki 12.4.2013

Riiko Schamarin

Lyhenteet ja käsitteet

KV Kiskoviiva. Korkeustaso, jossa rataiskkon alapinta kulkee.

PV Paikallavalettu.

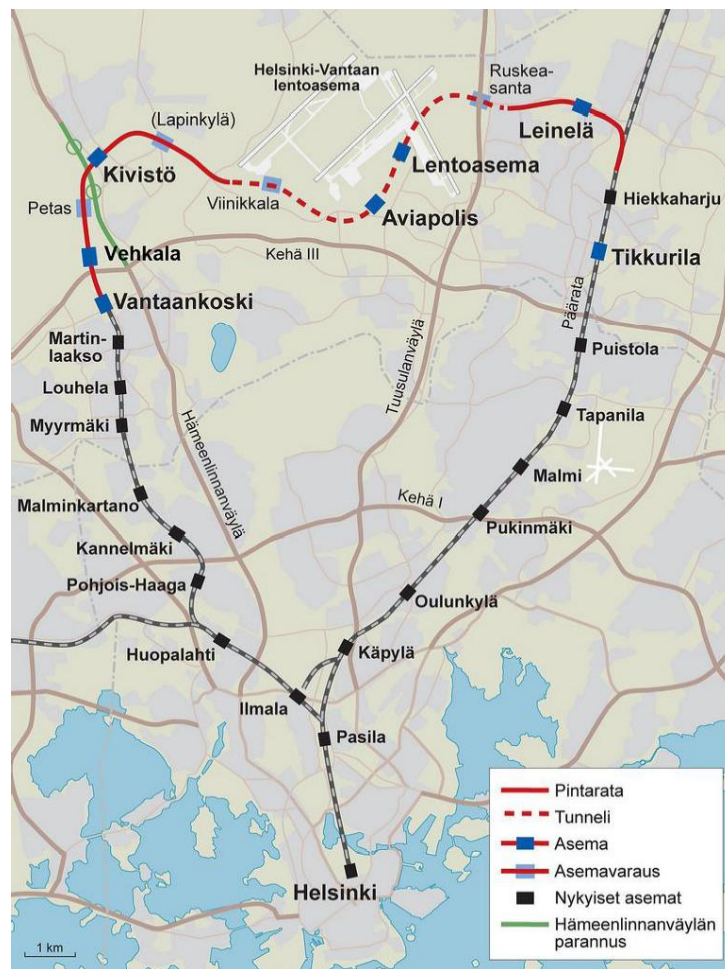
VR VR-Yhtymä Oy eli VR-Group.

Kampafakki Elementtiteline, johon elementit tuetaan ja kiilataan pystyasentoon.

Teodoliitti Kaukoputkella varustettu kulmamittauslaite, jolla mitataan kohteiden välistä pysty- ja vaakakulmia. [15.]

1 Johdanto

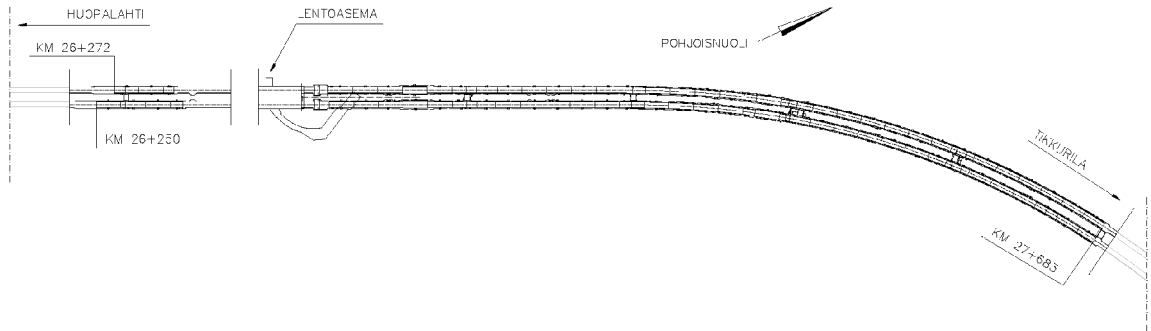
Tämä opinnäytetyö tehdään suunnittelu- ja konsultointiyhtiölle, Pöyry Finland Oy:lle. Pöyry Finland Oy on Kehäradan tunneliosuuden kokonaissuunnittelijana. Kehärata on rautatieyhteys, joka yhdistää Vantaankosken radan Helsinki-Vantaan lentoasemalle ja sieltä edelleen Vantaan Hiekkaharjussa päärataan. Kokonaispituudeltaan Kehärata on noin 18 km. Rataan sisältyy noin 8 km pituinen lentoaseman alittava tunneliosuus. Syvimmillään rata kulkee reilun 10 m syvyydessä Merenpinnan tasosta. Uusia junasemia Kehäradalle tulee viisi ja asemavarauksia kolme.



Kuva 1. Kehärata kartta. [13.]

Yhdeltä noin kilometrin pituiselta osuudelta tunnelista on löydetty haitta-aineita, jotka kiihdyttävät betoni- ja teräsrakenteiden korroosiota. Korroosion lisäksi haitta-aineiden hajoamistuotteena tunneliin syntyy lisäksi epämiellyttäviä hajuja ja irtoaa pölyä. Haitta-

aineet ovat glykoleja ja glykoleiden hajoamistuotteita. Glykoleja on pitkään käytetty ja käytetään edelleen lentokoneiden jään estoon ja poistoon, josta ne ovat etenkin aikaisemmin melko vapaasti imeytyneet kallioperään lentoaseman läheisyyteen. Kehäradan aluetta, josta haitta-aineita on löydetty, kutsutaan haitta-ainealueeksi. Haitta-ainealue sijaitsee Helsinki-Vantaan lentoaseman rataosuuden ympäristössä.



Kuva 2. Kehäradan haitta-ainealue. [1.]

Haitta-aineesta johtuen rakenteet on suojattava kauttaaltaan suojamembraanilla. Suojamembraani on vesi- ja kaasutiivis suojakalvo. Membraanilla estetään haitta-aineiden pääsy elementtitunnelin teräs- ja betonirakenteisiin. Membraani muodostaa betonielementtitunnelin ympärille yhtenäisen vesi- ja kaasutiiviin suojarakenteen. Haitta-ainealueella tunneli on päätetty toteuttaa betonielementtirakenteisena, toisin kuin muu tunneliosuus. Normaali tunnelirakenne toteutetaan eristämällä ja ruiskubetonoimalla louhittu kalliopinta.

Pöyry Finland Oy on pyytänyt haitta-ainealueen tunnelirakenteesta insinöörityötä, koska vastaavanlaisia betonielementtirakenteisia tunneleita ei Suomessa ole aikaisemmin tehty. Betonielementtirakenteinen tunneli asettaa omanlaisia vaatimuksia verrattuna paikallavaluna tai ruiskubetonointina toteutettuun tunneliin.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia betonielementtirakenteen valinnan perusteita sekä elementeille, elementtirakenteelle että niiden liitoksille asetettuja vaatimuksia. Lisäksi tutkitaan radan geometriaan, tunnelirakenteisiin, rakenteiden yhteensovittamiseen sekä elementtien kuljetukseen ja nostoon liittyviä ongelmia sekä ratkaisuja ongelmiin. Työn tavoitteena on myös analysoida asennuksen vaikutusta suunnitteluun ja etsiä ratkaisuja toteutusvaiheen ongelmiin.

Työn tavoitteena on saada Pöyry Finland Oy:lle kattava raportti betonielementtirakenteisen tunnelin suunnitteluun liittyvistä ongelmista ja ongelmien ratkaisuksista. Lisäksi tutkitaan, mitä elementtirakenteista tunnelia suunniteltaessa on otettava huomioon.

2 Betonielementtirakenne

2.1 Elementtirakenteelle asetetut vaatimukset

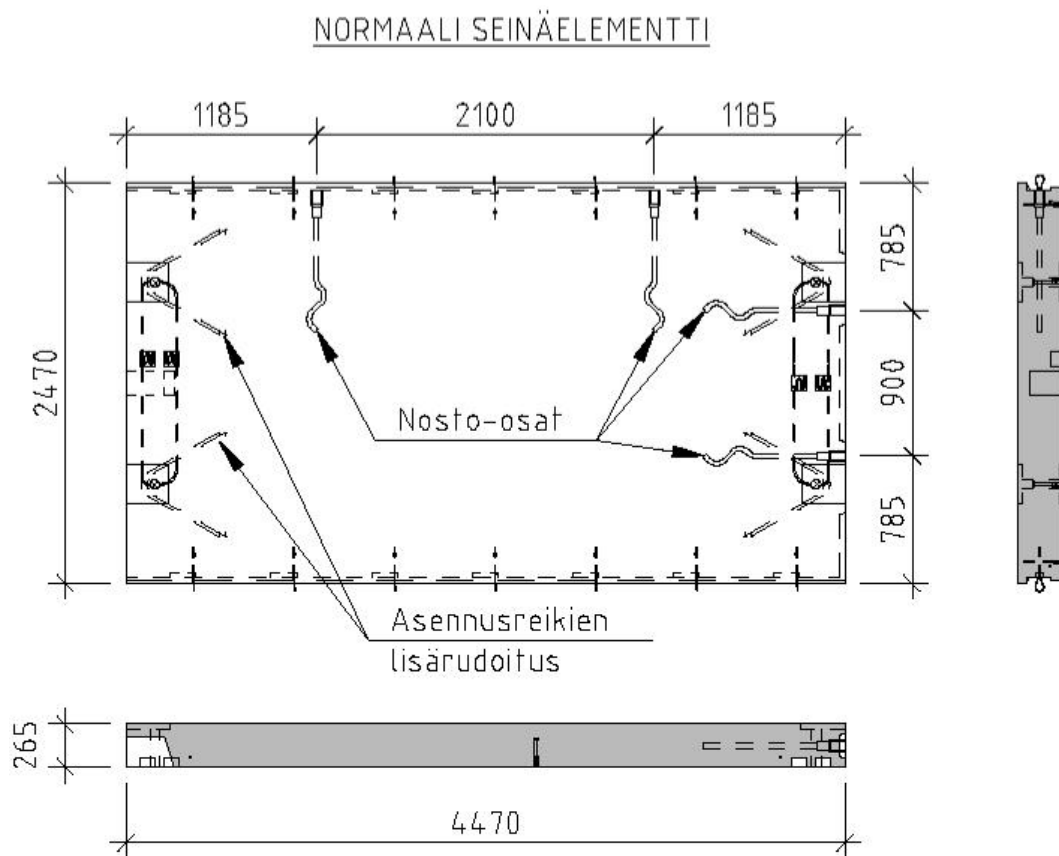
Elementtirakenteille asetetut vaatimukset tulee suunnitella tapauskohtaisesti. Rakenteelle määritetään muun muassa käyttöikä, paloluokka, betonin lujuusluokka, rasisluokka ja pintakäsittely. Määräyksiin vaikuttaa ympäristön aiheuttamat rasitukset, rakenteen käyttötarkoitus, rakenteen sijainti ja rakenteeseen kohdistuvat kuormitukset. Betonielementtirakenteista tunnelia ja sen rakenteita suunniteltaessa tulee huomioida erityisesti junista aiheutuvat imu- ja painekuormat, paloturvallisuus ja maan alla vallitsevat ilmasto-olosuhteet. Kun juna liikkuu suljetussa tunnelissa, se aiheuttaa ilmavirtoja. Ilmavirrat aiheuttavat ympäröivään tunnelirakenteeseen paine- ja imukuormia. Elementtirakenteisessa tunnelissa imu- ja painekuormat aiheuttavat rasituksia elementteihin ja niiden liitoksiin. Rakenteisiin syntyy myös dynaamista eli väsyttävää kuormaa, jonka vuoksi on tehtävä väsytystarkastelut. Lisäksi haitta-ainealueella tulee huomioida haitta-aineiden vaikutus. Elementtitunneli tulee suunnitella niin, että elementit muodostavat yhtenäisen, tiiviin ja jäykän rakenteen, jossa haitta-aineiden kulkeutuminen rakenteisiin on estetty. Teräsbetonirakenteille asetetut vaatimukset esitetään rakennepiirustuksissa ja työselityksessä. [1.]

Haitta-ainealueella käytettävien elementtien betonin lujuudeksi on asetettu K40-1. Lisäksi on määritetty, että seinäelementtien muotit voidaan purkaa ja elementtejä voidaan kuljettaa, kun betoni on saavuttanut lujuuden 15 MN/m^2 . Elementtejä voidaan asentaa, kun betoni on saavuttanut lujuuden 30 MN/m^2 . Koko tunnelirakenteen suunnittelukäyttöikäksi on määrätty 100 vuotta. Haitta-aineiden takia rakenteet ovat rasisluokalta XC3 ja XA3. Terästen betonipeitteen nimellisarvoksi on määrätty 40 mm sallitun mittapoikkeaman ollessa 10 mm. [1.]

Kehäradalla esiintyneet haitta-aineet kiihdyttävät terästen korroosiota, minkä vuoksi haitta-aineiden kanssa mahdollisesti kosketuksissa olevien terästen tulee olla ruostumattomia. Elementeissä käytettävien harjatankojen tulee olla tyyppiä A500HW. Alkupe-

räisessä suunnitelmassa oli myös B600KX (ruostumaton teräs) tyyppin teräksiä, mutta suojamembraanin takia pystyttiin käyttämään ainoastaan A500HW teräksiä. Piirustuksissa on määriteltä myös jatkos- ja ankkurointipituudet sekä sallitut taivutustelojen halkaisijat erikseen jokaiselle harjatangon halkaisijalle. [1.]

Elementtien liitoskohtien syvennysten ja reikävarausten sekä elementin lyhyen sivun nosto-orsien mittatarkkuudeksi on määrätty ± 5 mm. Liitoskohtien mittatarkkuus on hyvin tärkeää elementtien yhteensovittamisen kannalta. Pitkässä tunnelissa pienetkin mittaepätarkkuudet voivat kasvaa suuriksi ja huomaamatta aiheuttaa ongelmia elementtien asennuksessa. Lisäksi seinäelementtien toleranssipoikkeamat voivat vaikuttaa kaarielementtien asennettavuuteen. Elementtien viisteissä käytetään niin sanottua kynäpyöritystä. Tämä tarkoittaa, että elementtien reunat on viimeistely ja huomaamattomat. Elementtejä valettaessa muotin tulee olla sileävalu. Elementin käsiteltävä pinta tulee olla hiottu pinta, josta sementtiliima on poistettu. Elementtien paloluokaksi on määrätty koko haitta-ainealueella R120, joka tarkoittaa, että elementtirakenteen tulee säilyttää kantavuutensa ja kestää sortumatta palotilanteessa 120 minuuttia. [1.]



Kuva 3. Normaali seinäelementti ja leikkaukset. [1.]

Elementtien nostoille asetettuja vaatimuksia on tärkeä noudattaa työmaaturvallisuuden vuoksi. Elementtien nosto on sallittu ainoastaan elementin nosto-osista. Elementit tulee myös kääntää nosto-osien varassa. Piirustuksissa on myös määritetty elementtien sallituksi nostokulmaksi 30°. Kuvassa 3 näkyy normaalin seinäelementin nosto-osat ja liitoskohtien asennusreikien lisäraudoitus. Liitosten syvennykset ja asennusreiät injektoidaan umpeen, kun liitokset on kiinnitetty. Elementtien rakennuspiirustuksissa on määrätty, että valmiin elementin injektointiletkujen sijainti ja puhtaus on pystyttävä toteamaan. [1.]

2.2 Elementtirakenteinen tunneli

Kehäradan haitta-ainealueen betonielementtirakenteinen tunneli on rakenteeltaan ilmatiivis. Koko haitta-ainealueen läpikulkeva tunneli on yhtenäinen ja suojakalvotettu betonirakenne. Lentoasemalta ja sen läheisyyteen louhitusta tunneliosuudesta on löydetty glykoleja ja sen hajoamistuotteita sisältävää vuotovettä, vesihöyryä ja kaasua. Glykolit ja niiden hajoamistuotteet ovat erittäin aggressiivisia teräs- ja betonirakenteille. VTT:n tekemien tutkimuksen mukaan kuumasinkittyjen kalliopulttien sinkitys syöpyy tässä ympäristössä kokonaan jo noin 2 vuoden kuluessa. Tämä on esitetty Liikenneviraston tekemässä raportissa: Glykolisuojausten yleiskuvaus. Lisäksi jo 8-12 vuoden kuluttua suojaamattoman hiiliteräksen asennuksesta hiiliteräs voi menettää rakenteellisen kestävyytensä haitta-aineiden aiheuttaman korroosion takia. Haitta-aineiden hajoamistuotteena syntyvä haju ja niistä irtoava pöly on todettu epämiellyttäväksi matkustajille. [2, s. 1-3.]

Haitta-aineiden suojaamattomille teräs- ja betonirakenteille aiheuttaman korroosion vuoksi alueen rakenteet noudattavat standardin SFS-EN 1992-1-1 mukaista rasitusluokkaa XA3. Rasitusluokan XA3 vaatimukset betonipeitteen paksuudelle ja betonin vähimmäislujusluokalle on esitetty standardeissa SFS-EN 1992-1-1 ja SFS-7022. Rakenneratkaisuja suunniteltaessa on keskitytty rakenteiden riskittömyyteen, huollettavuuteen ja rautatieliikenteen häiriöttömyyteen. [2, s. 2-3.]

Haitta-ainealueella on määritetty erikseen käytettäväksi sallitut rakennusmateriaalit. Aggressiivisella eli suojaamattomalla alueella käytettävien terästen teräslaatu tulee olla haponkestävä standardin EN 14404 (ASTM-standardi- 316L) mukainen teräs. Aggressiivisessa ympäristössä käytettävien teräs- ja ruiskubetonien tulee täyttää rasitusluokan

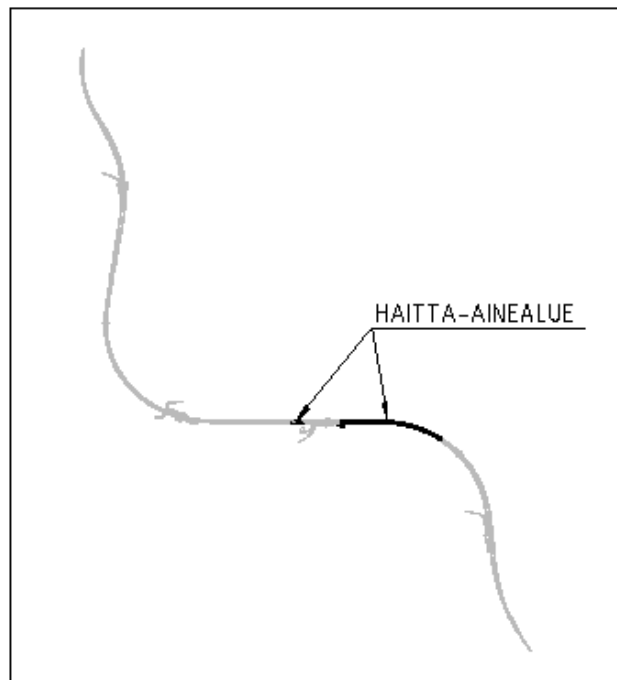
XA3 asettamat vaatimukset. Pultit ja kallioankkurit on juotettava kallioon epoksihartsijuotoksella. Lisäksi koko rakennetta ympäröi kauttaaltaan 2 mm:n paksuinen suojakalvo eli suojamembraani. [2, s. 3.]

Tunnelilouhosta on avarrettu haitta-aineita löytyneeltä tunneliosuudelta, jotta betonielementtirakenteinen tunneli on mahdollista toteuttaa. Koska haitta-aineita löydettyessä hankkeen aikataulu oli kiireinen, päätettiin laajennuslouhinta toteuttaa etukäteen, jotta aikataulu ei viivästyisi louhinnan takia. Laajennuslouhinta muodostaa kalliopinnan ja tunnelirakenteen väliin noin 800-1 000 mm leveän välitilan. Välitila mahdollistaa elementtien liitosten ja suojamembraanin asentamisen sekä niiden tarkkailun myöhemmin. Lisäksi välitila toimii tunnelin huoltotilana, jonka kautta seurataan muun muassa rakenteiden ja erityisesti suojakalvon kuntoa ja havainnoidaan mahdollisia vuotokohtia. Välitilassa tehdään myös rakenteiden ja likaisten vesien kuivatus- ja keruujärjestelmän huoltotoimenpiteet. Välitilaan kulku tapahtuu yhdystunneleiden kohdalta ja haitta-ainealueen päädyistä kahden oven muodostaman ylipaineistetun sulkutilan kautta. [2, s. 5-8.]

Välitilat on palo-osastoitu jokaisen yhdystunnelin kohdalta. Rakenteiden suojakalvona käytetään itsestään sammuvaa kalvoa palokuorman vähentämiseksi. Lisäksi näkyvillä olevista ruiskubetonisalojista poistetaan polyeteenimatot. Polyeteeni on valmistettu polymeroimalla eteeni. Välitilaa ympäröivä holvilouhos on pultitettu ja verkotettu haponkestävällä teräksellä sekä ruiskubetonoitu betonilla, jolle on määritetty rasisluokaksi XA3. XA3 rasisluokka tarkoittaa hyvin aggressiivista kemiallista ympäristöä. Lujitusbetoni on salaojitettu vuotoalueiden kohdilta ja sen on tarkoitus kestää haitta-aineiden aiheuttamat olosuhteet. [2, s. 9-10; 14.]

Kehäradan pohjoinen ratatunneli on jaettu 10 m välein paalulukuihin, joiden avulla tunnelin mittaaminen on mahdollista. Betonielementtirakenteinen tunneli sijoittuu pohjoisessa ratatunnelissa km-välille 26+272 – 27+684 ja eteläisessä 26+250 – 27+683. Ensimmäinen numero tarkoittaa paalun kilometrimäärää ja toinen luku paalun metrimäärää. Haitta-ainealueen välissä sijaitsee lentoaseman juna-asema. Tunnelirakenne koostuu paikalla valetusta pohjalaatasta, seinäelementeistä ja yksi- tai kaksiosaisesta kattoelementistä. [1.]

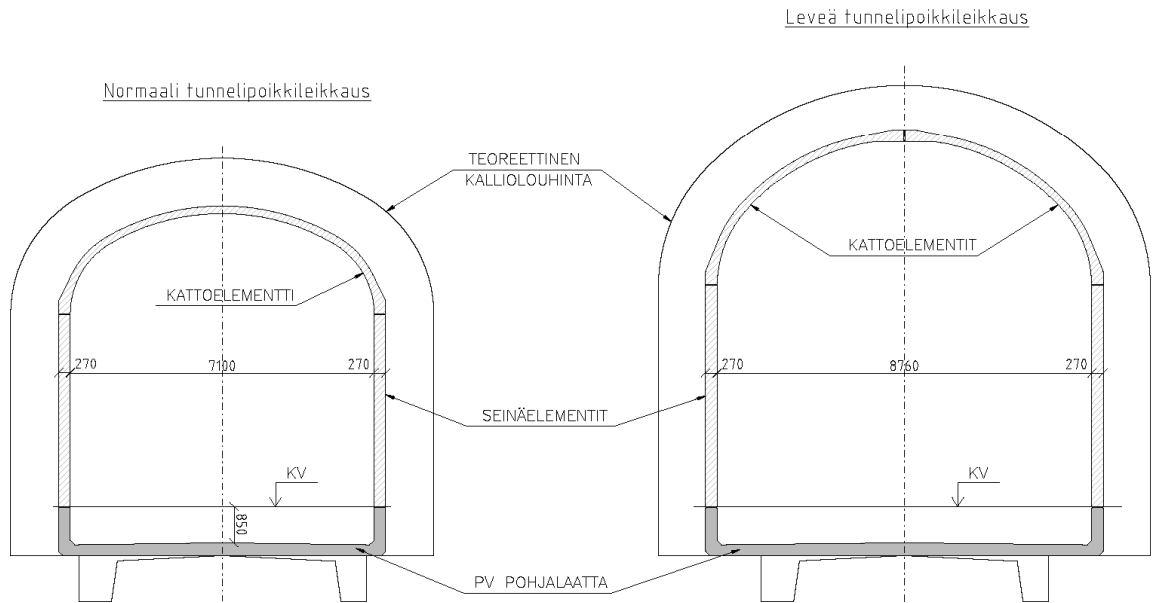
KEHÄRATA



Kuva 4. Kehäradan haitta-ainealueen laajuus. [1.]

Tunnelin seinäelementit ovat kapealla tunneliosuudella 2470 mm leveitä ja 4475 mm korkeita. Leveällä tunneliosuudella seinäelementit ovat 2470 mm leveitä ja 5155 mm korkeita. Kattoelementit toteutetaan kapealla osuudella yhtenä ja leveällä osuudella kahtena 2470 mm leveänä elementtinä. Elementit kiinnitetään toisiinsa ja paikalla valettuun pohjalaattaan erillisillä kiinnitysosilla. [1.]

Tunnelin paikalla valetun pohjalaatan paksuus tunnelin keskilinjalla on 300 mm, josta se ohenee tunnelin reunoille 260 mm:n. Pohjalaatan reunoille valetaan noin 850 mm korkeat ja 320 mm leveät seinämät eli sokkelit, joiden päälle seinäelementit kiinnitetään. Pohjalaatan alle on valettu tasausbetoni. Asennuksen helpottamiseksi tasausvalu on valettu elementtitunnelia leveämmäksi. Välitilassa oleva tasausvalu suojaa myös pohjalaatan alla olevaa suojamembraania asennusvaiheessa. Lisäksi suojamembraania suojaa geotekstiili sen ylä- ja alapuolelta. [1; 3.]



Kuva 5. Leveän ja kapean tunneliosuuden poikkileikkaus. [1.]

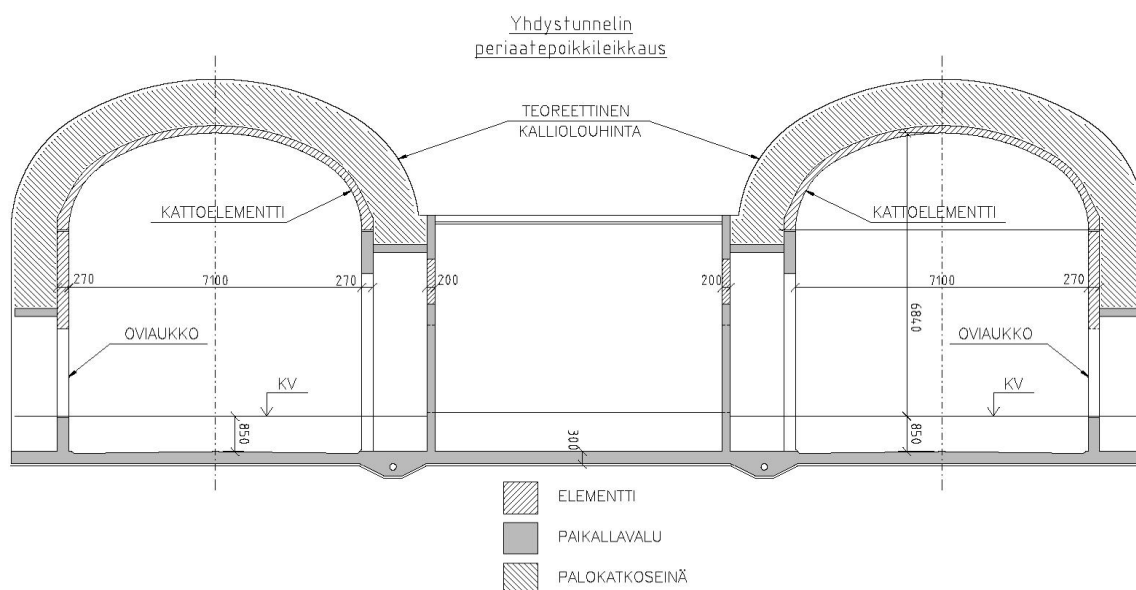
Ratatunnelin rakenteet ja asennukset on mitoitettava junaliikenteestä aiheutuville imu- ja painekuormille. Mitoituksessa käytetään staattisen kuorman arvona $\pm 4,0 \text{ kN/m}^2$ ja väsyttävälle painekuormalle arvoa $\pm 2,6 \text{ kN/m}^2$. Yhdystunneleiden pohjalaatta valetaan tasaisena 250 mm paksuna laattana. Paikalla valetut rakenteet sekä valusaumat raudoitetaan erillisen raudoitussuunnitelman mukaan. Pohjalaatat valetaan 30 metrin pituisina valuina, joiden väliin muodostuu liikkumisvara eli liikuntasäama. Jokaiseen liikuntasäamaan valetaan pontti. Pohjalaatat on kiinnitetty kallioon 30 m välein kiinnitysrivoilla ja tapeilla. Rivojen ja tappien tarkoitus on ottaa vastaan junan aiheuttamat jarrukuormat. [1; 4, s. 20.]



Kuva 6. Pohjalaatan kiinnitysripa ja tapit.

Normaalin eli kapeamman tunneliosuuden seinäelementtien ja ratalinjan välinen etäisyys täytyy olla minimissään 3550 mm kummallakin puolella ratalinjaa. Junan ja seinän käsijohteen väliin jäävä alue on oltava ratalinjan molemmilla alueilla 1600 mm. Etäisyys on VR TRACK Oy:n asettama pienin sallittu turvaetäisyys junatunnelille. Haitta-ainealueelle on varattu kaksi leveämpää tunneliosuutta savunpoistopuhaltimia varten. Tunnelin levennyksiin on rakennettu suppilo-rakenteet, joiden pääasiallinen tarkoitus on ohjata ilmavirtaa tunneliin. Lisäksi suppilot pienentävät tunneliin syvennyksiin junista aiheutuvaa imu- ja painekuormaa. Leveän tunneliosuuden seinäelementtien välinen vähimmäisleveys on 8760 mm. Normaalin tunnelin kattoelementin harjakorkeus on kiskoviivan tasosta on 6840 mm ja leveämmän tunnelin korkeus KV-tasosta 8535 mm. KV on junaraiteelle määritelty kiskoviiva, jossa rataiskun alapinta sijaitsee. Haitta-ainealueella on myös kymmenen kappaletta palopostisyvennyksiä noin 200 m välein sekä kaksi sähkösyvennystä. Syvennykset toteutetaan osittain elementtirakenteisena ja osittain paikallavaluna. [1; 4; 5.]

Betonielementtitunneli kuuluu paloluokkaan P1. Tunnelin kantavat betonirakenteet ovat palonkestovaatimukseltaan R 120. Osastoivat betonirakenteet sekä ratatunneliin liittyvät osastoivat ovet ovat tiiveys- ja eristämisluokkaa EI 120, elleivät palokuormat edellytä korkeampaa vaatimusta. [4, s. 22.]



Kuva 7. Yhdystunnelin poikkileikkausperiaate. [1.]

Haitta-ainealueella sijaitsee viisi pohjoisen ja eteläisen ratatunnelin yhdistävää yhdystunnelia. Yhdystunnelit ovat savu- ja palo-osastoituja ja niiden seinärakenteet ja pohjalaatta toteutetaan paikallavaluna. Pystyseinät valetaan louhittuun kalliopintaan asti ja ankkuroidaan kallioon kallioankkureilla. Tunneli on jaettu noin 200 m välein palo-osastoihin jokaisen yhdystunnelin kohdalta. Palo-osastot erotetaan kalliotunnelissa toisistaan palokatkoseinillä. Palokatkoseinä kiinnitetään alapinnasta tunneliprofiiliin ja yläpinnassa kallioankkureilla louhittuun kalliopintaan. Jos kaarevan kattoelementin ja kalliopinnan välinen etäisyys ylittää 1,2 m palokatkoseinän kohdalla, kattoelementti on tuettava elementin keskeltä palokatkoseinän valun aikana. Tuennan voi poistaa vasta, kun seinämän betoni on kovettunut. [1.]

Yhdystunneleiden suojarakenteissa käytetään tunneliprofiilina teräspoimulevyä. Teräsprofiilin harjakorkeus lattialaatan yläpinnasta on noin 4950 mm ja leveys noin 6300 mm. Poikkeuksena yksi erikoislevy yhdystunneli, jossa on sähkökeskus ja muuntamo. Yhdystunnelin pohjalaatta erotetaan elementtitunneleista liikuntasaumoilla. Kaikkien betoni-teräs rakenteiden ympärille asennetaan suojamembraani suojaamaan rakenteita haitta-aineilta. [1.]

2.3 Elementti

Normaalin seinäelementin, jota käytetään kapean junatunneliosuuden seinissä, mitat ovat 4470x2470x270 mm. Elementti painaa 75 kN ja on tilavuudeltaan 3,0 m³. Elementin sivuilla ja yläpäässä on 40 mm syvät pontit sekä sivuilla 625 mm:n jaolla vaarnalengit elementtien saumaraudoitusta varten. Elementtien kiinnitysosat on alun perin mitoitettu ilman pontteja ja saumaraudoitusta. Pontit ja saumaraudoitus tuo elementtitunneliin lisävarmuutta. Elementtien sivuissa olevat pontit ottavat vastaan vaakasuuntaisia leikkausvoimia ja vaarnalengit pystysuuntaisia leikkausvoimia. Lisäksi elementin alapäässä, liitoskohtien kohdalla, on 190 mm syvät syvennykset, jotka valetaan umpeen muiden saumavalujen yhteydessä. [1; 3.]



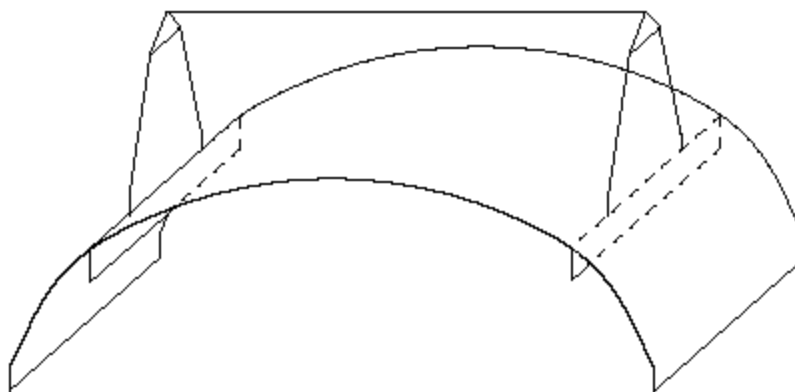
Kuva 8. Seinäelementin sivun pontti ja vaarnalengit.

Seinä- ja kattoelementit maadoitetaan 12 mm halkaisijaltaan olevilla maadoitusteräksillä. Seinäelementeissä maadoitusteräs voidaan sijoittaa betoniteräksiin köysilukon sijaan hitsaamalla. Hitsaus edellyttää, että betoniteräksset ovat hitsattavia. Hitsaus ei ole mahdollista B500K teräksiin. Elementtien maadoituksessa käytetään S235JR lujuusluokan teräksiä. Maadoitusteräksset jatketaan ja sidotaan hitsaamalla 4 x 40 hitseillä, joiden hitsausluokka on D. Maadoitusteräksset sidotaan vähintään metrin välein kolmella sidoslangalla betoniteräksiin. Kaikki maadoitukset, jotka ovat näkyvissä tai sijaitsevat betonipeitteessä, on oltava haponkestävää terästä. [1.]

Seinäelementit valetaan tehtaalla pystyssä, mutta kuljetetaan suuren kokonsa vuoksi kyljellään. Aluksi elementtien liitoskohtien asennusreiät (ks. kuva 10 ja 11) suunniteltiin porattavaksi jälkikäteen timanttioralla. Muottivaluna tehdyt asennusreiät ovat injektoinnin onnistumisen kannalta epävarmempia. Injektoinnin jälkeen liitoksen täytyy muodostaa yhtenäinen kestävä rakenne. Tästä syystä elementtiin ei voida jättää esimerkiksi metalliputkea tai vastaavaa muottia. Jos muoteissa käytetään muottiöljyä, se voi estää injektointimassan imeytymisen elementin betonipintaan.

Ongelma ratkaistiin käyttämällä valumuottina 50 mm halkaisijaltaan olevaa muoviputkea, jonka päällä on karheapintainen 10 mm paksu solumuovi. Elementtimuotteihin asennetaan suppilokannakkeet asennusreikien kohdalle, jotka pitävät muoviputken paikallaan. Solumuovi poistetaan valun jälkeen, jolloin elementtiin saadaan karhea ja hyvä tartuntapinta injektointia varten. Ennen liitosten asentamista työmaalla asennusreiät on puhdistettava, jotta varmistetaan injektoinnin onnistuminen. [5.]

Normaalin junatunneliosuuden kattoelementti (kaarielementti) on yksiosainen. Kaarielementin paino on 115 kN ja tilavuus 4,6 m³. Kaarielementin muotteja purettaessa ja elementtejä siirrettäessä betonin lujuus tulee olla 25 MN/m² sekä elementtejä asennettaessa 35 MN/m². Kaarielementtien maadoitusasennukset tulee tehdä erillisen tarkastusasiakirjan mukaan. Lisäksi valmiin elementin injektointiletkujen sijainti ja niiden ehdoton puhtaus on pystyttävä todentamaan. Kaarielementit nostetaan kuljetusvaiheessa ylhäältäpäin nelipistenostona käyttäen kuormantasauslevyllä varustettua nostopalkkia. Ylhäältä nostettaessa vähimmäispituus nostoakselille on 2 m ja sallittu haarakulma 35°. Asennusvaiheessa elementit nostetaan lavetilla alhaalta päin, jolloin nostopalkit tulee sijoittaa nosto-osia vastaavasti. Kaarielementtien maadoitus toteutetaan vastaavasti kuin seinäelementtien. [1.]



Kuva 9. Kaarielementin nelipistenosto. [1.]

3 Liitokset

3.1 Liitoksille asetetut vaatimukset

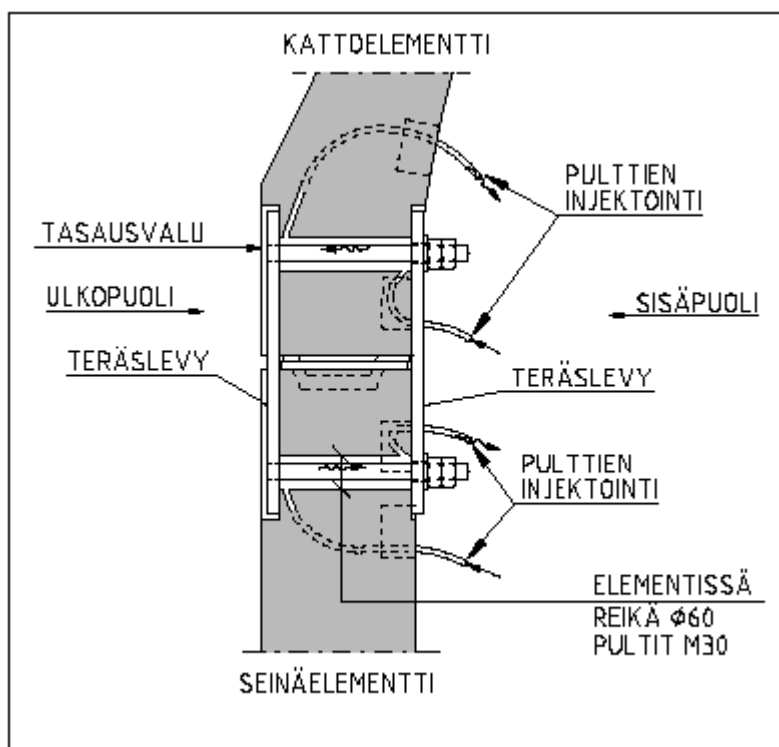
Liitokset on pyritty suunnittelemaan niin, että samoja liitoksia voidaan käyttää paikalla valetun pohjalaatan ja seinäelementtien liitoksina ja seinäelementtien ja kattoelementtien liitoksina. Liitoskappale on teräksinen levy-pultti-liitos, jossa kaksi teräslevyä kiinnitetään elementtien kummallekin puolelle halkaisijaltaan 30 mm:n pulteilla. Pulttien päissä on M30 kierre. Pultit ovat lujuusluokaltaan 8.8. Elementteihin on varattu pultteja varten halkaisijaltaan 60 mm asennusreiät, jolloin asennustoleranssi on 30 mm pulttia kohden. Liitokset on suunniteltu jäykkinä liitoksina, jolloin kuormitusmomentti siirtyy teräslevyjen kautta pulteille leikkausrasituksena. Jotta liitokset toimisivat jäykkinä liitoksina, asennusreikien ja pulttien väli on injektoitava umpeen injektointimassalla liitosten asennuksen jälkeen. Injektoinnilla varmistetaan, että pultit ovat koko pituudeltaan tiukasti kiinni elementissä. Injektointimassan puristuslujuuden tulee olla vähintään yhtä suuri kuin elementtien puristuslujuuden. Ilman onnistunutta injektointia liitokset eivät toimi suunnitellulla tavalla ja niiden kapasiteetti on pienempi kuin mitoituskapasiteetti. Injektointimassan tulee säilyttää myös kapasiteettinsa palotilanteessa. Injektointimassan palonkestovaatimus on sama, kun tunnelirakenteella eli R120. [1; 5.]

Injektoinnilla tarkoitetaan elementtien ja kiinnikkeiden välisten saumojen täyttämistä nestemäisellä kovettuvalla massalla. Injektoinnin tarkoitus on lujittaa rakenne. Injektointimassaa syötetään liitoksiin injektointiletkujen kautta, kunnes massa tulee poistoletkua pitkin ulos. Näin ilma pääsee pois liitoksesta ja varmistetaan injektoinnin onnistuminen.



Kuva 10. Paikalla valetun sokkelin ja seinäelementtien liitokset tunnelin sisäpuolelta ennen elementtien saumavalua ja liitosten injektointia.

Injektointi on suoritettava sopivalla paisuvalla mikrosementtipohjaisella laastilla, jonka lujuusluokka on $\geq K45$. Hyvien lujuusominaisuuksien vuoksi aluksi harkittiin hartsipohjaisen injektointimassan käyttöä, mutta sen huonon palonkestävyyden takia päätettiin injektointi toteuttaa sementtipohjaisella seoksella. Injektointimassaksi valittiin paisuva (kutistumaton) injektointisementti Nonset 50 (Mapei). Liitoskohdasta on tultava injektointaessa yhtenäinen rakenne, jolloin injektointimassan on oltava ehdottomasti kutistumaton. Muita massan valintaan vaikuttaneita ominaisuuksia olivat sen puristuslujuus yli 50 MPa, reagointi tuleen Euroluokkaa A1 ja sen notkeus sekä suurin mahdollinen raekoko. Euroluokan A1 rakennusmateriaalit ovat palamattomia. Injektointiletkuiksi on valittu sisähalkaisijaltaan 10 millimetrin letkut. Alkuperäisessä suunnitelmassa elementteihin oli varattu pultteja varten 45 mm reiät, mutta työmaan ja elementtien asennuksen helpottamiseksi asennustoleranssia haluttiin kasvattaa. Pitkässä ja kaarevassa tunnelissa on suuri riski, että elementtejä asennettaessa suunnitellut mitat eivät riitä ja asennustoleranssit ylittyvät. Elementeissä olevien liitosreikien suurentaminen lisää injektoitavan reiän pinta-alaa ja tällöin injektoinnin onnistumisen merkitys kasvaa entisestään. Injektointi on suoritettava tuotteen valmistajan ohjeiden mukaan. [1; 5; 6; 7.]



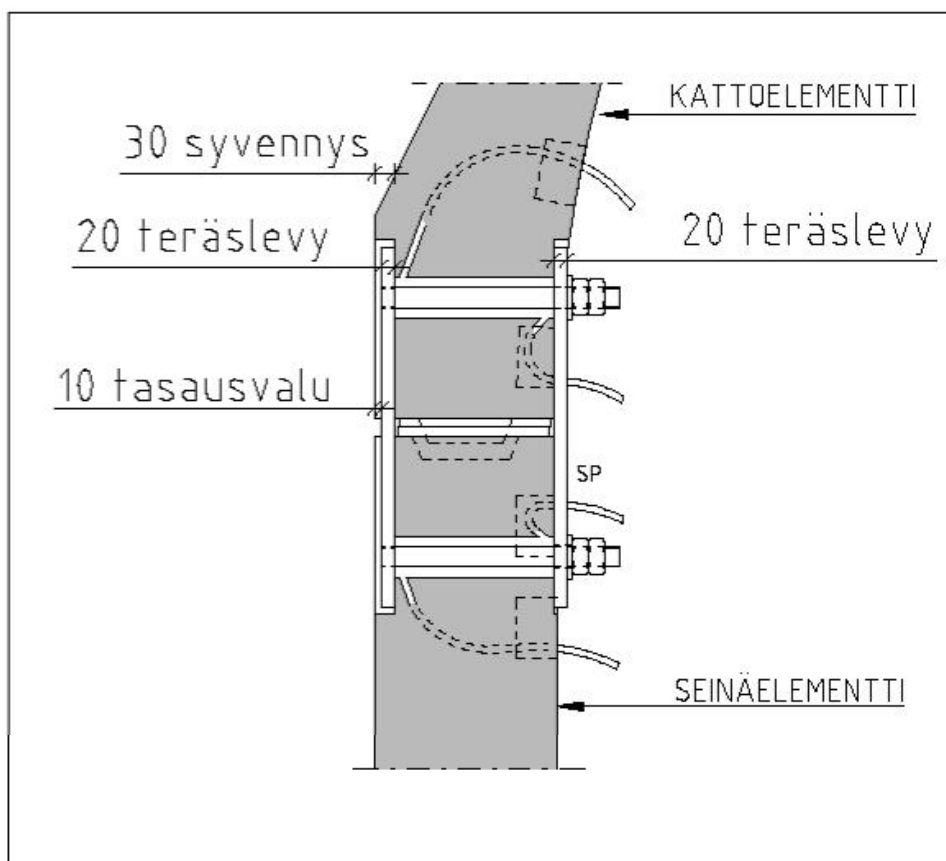
Kuva 11. Leikkaus kapean tunneliosuuden katto- ja seinäelementin liitoksen injektoinnista. [1.]

Liitosten tulee kestää kaikki niille kohdistuvat kuormat. Liitoksia rasittaa junista aiheutuva imu- ja painekuorma. Imu- ja painekuorman sekä kattoelementin omanpainon lisäksi liitoksille voi syntyä asennusaikana taivutusmomenttia kattoelementin päällä mahdollisesti kulkevasta palokatkoseinästä. Palokatkoseinät jakavat kalliotunnelin noin 200 m välein palo-osastoihin. Palokatkoseinä on 200 mm paksu betoniseinä, joka ulottuu tunnelin ulkokuoresta kalliolouhintaan asti. Kun palokatko seinä on kovettunut, ei se aiheuta enää tunneliin rasituksia. [1; 5.]

Kaikki tunnelin sisäpuolella näkyviin jäävät teräsosat kuten pultit, mutterit ja levyt on palosuojattava. Palosuojauksen palonkestoluokaksi on vaadittu R120 sekä käytetyillä tuotteilla täytyy olla varmennettu käyttöseloste. Aluksi palosuojaus suunniteltiin suoritettavaksi esim. Sika Permacor 2760 EG (kuumasinkityiden pintojen esikäsitteilyaine) + Sika Unitherm Steel S EXT ECO (palosuojapinnoite) + Sika Unitherm TOP S (pintamaali) tai vastaavanlaisella tuoteperheellä. Lopulta päätettiin valaa tunnelin sisäpuolen liitosten päälle sementtimassa, joka suojaa liitoksia palotilanteessa. Massan paksuuden tulee olla riittävän paksu, jotta se täyttää palonkestoluokan R120 vaatimukset. Massa tulee kiinnittää elementtiin, jotta se ei irtoa junan imukuorman vaikutuksesta tai palotilanteessa. [1.]

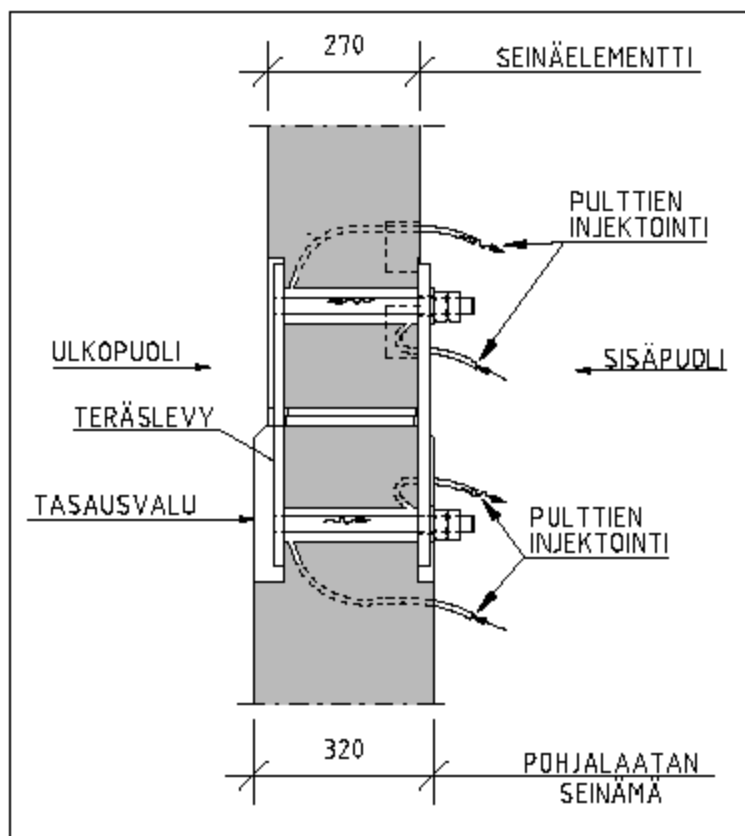
3.2 Liitoskohtien kuvaus

Seinä- ja kattoelementin liitoskohdan paksuus on 270 mm. Tunnelin ulkopuolelle on varattu 30 mm syvennys ja sisäpuolelle elementin kaarevuudesta johtuen noin 5-25 mm syvennys. Syvennykseen tulevan teräslevyn paksuus on 20 mm, joten tunnelin sisäpuolella teräslevy jää osittain syvennyksen ulkopuolelle. Tunnelin ulkopuolen liitos valetaan tasan elementtipintojen kanssa asennuksen jälkeen. [1; 5.]



Kuva 12. Kattoelementin ja seinäelementin liitosperiaate. [1.]

Elementteihin ja paikalla valettuun pohjalaattaan on tehty liitoksia varten syvennykset tunnelin sisä- ja ulkopuolelle. Paikalla valetun pohjalaatan seinämän paksuus on 320 mm, joten liituskappaleiden takia paikalla valettuun seinämään joudutaan tekemään elementtejä suuremmat syvennykset. Kaikissa liitoskohdissa syvennysten väliin jäävä betoni on 235 mm paksu. Alkuperäisissä suunnitelmissa sokkeliseinä oli yhtä paksu kuin seinäelementtikin. Sokkelia päätettiin kuitenkin levenyttää asennuksen helpottamiseksi. Seinäelementtiä leveämmällä sokkelilla saadaan elementtien asennukseen hie- man lisää asennusvaraa. [1; 5.]



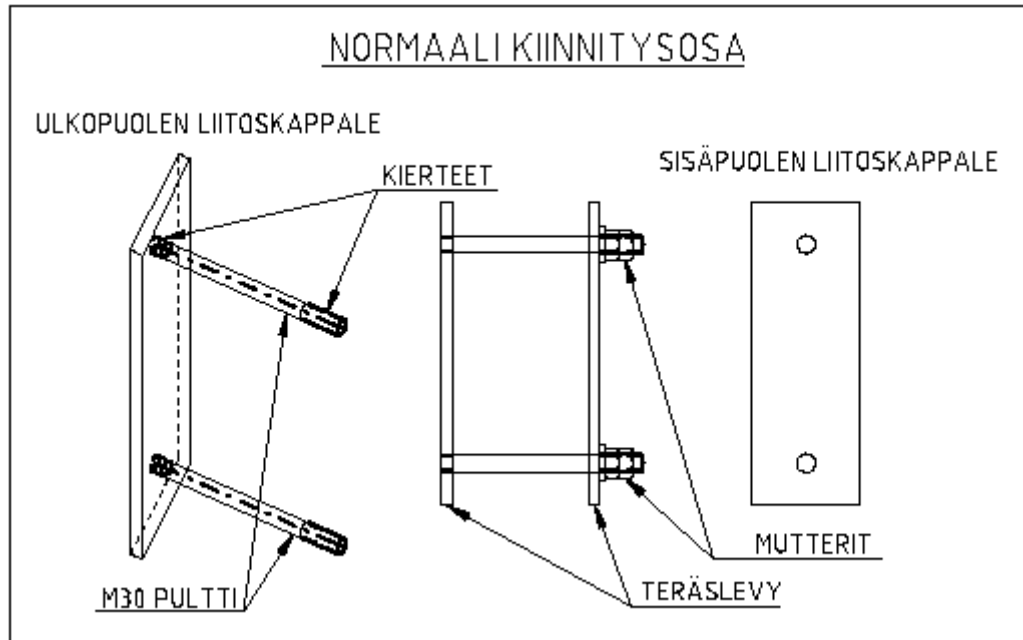
Kuva 13. Seinäelementin ja pohjalaatan seinämän liitospoikkileikkaus. [1.]

Leveän tunneliosuuden erilliset kaarielementit on tarkoitus liittää toisiinsa vastaavan mallisilla kiinnikkeillä kuin kapeassa tunneliosuudessa. Kaarielementtien kiinnitysosien teräslevyn pituutta on kasvatettu 40 mm ja pulttien halkaisijaa 6 mm. Lisäksi kiinnitysosan keskelle on lisätty yksi 36 mm halkaisijaltaan oleva pultti. [1.]

Työmaa ei etene tämän opinnäytetyön aikana niin pitkälle, että leveää tunneliosuutta päästäisiin rakentamaan. Tästä johtuen ei ole vielä varmuutta, tuleeko kaksiosaisten kaarielementtien kiinnityisperiaate vielä muuttumaan.

Tunnelin sisäpuolella pultteihin kiinnitetään irrallinen asennuslevy M30 kuusiomuttereilla. Tunnelin ulkopuolella olevaan teräslevyyn pultit kiinnitetään kierrelitoksella. Myös tappien hitsaamista teräslevyyn tutkittiin, mutta kiinnikkeen leikkauskestävyyden lisäämiseksi ja paloturvallisuusriskin pienentämiseksi työmaalla, päätettiin tapit kiinnittää kierrelitoksilla. Koska sisäpuolen levy kiinnitetään myös mutterikiinnityksellä, vain pulttien päät voivat olla kierteellä. Muuten sisäpuolen mutterin kiristäminen aiheuttaisi pultin ylikiertymisen vastapuolen teräslevyyn. Myös injektoinnin toteuttaminen ja onnistu-

minen on helpompaa sileään terästankoon kuin kierretankoon. Kaikki teräsosat, pultit, ruuvit ja mutterit pintakäsitellään kuumasinkityksellä. Ennen kun reiät injektoidaan, on varmistettava, että sinkkikerros on passivoitunut riittävästi. Ennen asentamista sinkityksen on oltava 6 viikkoa vanhaa tai pultit on passivoitava kromiliuoksella. [1; 6.]



Kuva 14. Betoniliitosten normaali kiinnitysosa. [1.]

Pulttien asennusreiät ja liitosten asennusvarat injektoidaan injektointiletkujen avulla. Elementtien pysty- ja vaakasaumat valetaan umpeen jälkivaluna. Elementtien saumavalu tiivistää tunnelirakenteen. [1.]

Ennen kiinnitysosien sarjatuotannon aloittamista on määrätty, että kiinnitysosien toimivuus varmistetaan tunnelin normaali poikkileikkauksessa. Tunnelin rakennus on aloitettu itäiseltä suuaukolta lähtien pohjoisesta ratatunnelista. Tässä vaiheessa työmaalla on asennettu ensimmäiseen yhdystunneliin asti seinäelementtejä ja kaksi kaarielementtiä. Koeasennuksissa ei ole havaittu ongelmia elementtien tai kiinnitysosien kanssa, joten kiinnitysoseen ei ole tehty muutoksia. [1; 3.]

3.3 Liitosten rakenteellinen toiminta

Elementtien vaakasaumojen kiinnitys on toteutettu kiinnitysosilla ja saumavalulla. Lisäksi elementtien nosto-osan kierretanko on jätetty elementin jälkivaluun vahvistamaan liitosta. Elementtien pysty- ja vaakasaumat valetaan umpeen saumavalulla. Elementtien pystysaumoissa pysty- ja vaakasuuntaisia leikkausvoimia vastaanottavat elementtien pontit, vaijerilenkit ja kaksi pystysuuntaista saumaterästä (halkaisija 10 mm).

Liitoksia rasittaa junista aiheutuva imu- ja painekuorma, elementtien omapaino ja yhdystunneleiden kohdalla elementtitunnelin päällä kulkevien palokatkoseinien aiheuttamat kuormat. Elementteihin syntyvien kuormien on tarkoitus siirtyä liitoskohtien injektointiin ja saumavalujen kautta kiinnitysosille ja saumaraudoitteille. Suurimmat rasitukset kohdistuvat kiinnitysosiin.

Koska elementtien liitoksia kuormittavat suuret rasitukset, on riski, että kiinnitysosien pulttiliitos aiheuttaa elementin reunaan kartion muotoisen lohkeaman. Tämän estämiseksi asennusreiän ympärille on tehtävä ankkurointi eli lisäraudoitus. Pulttiliitosten asennusreiät on sijoitettu 610 mm päähän elementin reunoista, jotta lisäraudoitus saadaan mahtumaan elementtiin. Lisäraudoitus tehdään elementtien lisäksi myös paikalla valettujen rakenteiden asennusreikien kohdalle [5.]



Kuva 15. Seinä- ja kaarielementin vaakasauman liitos.

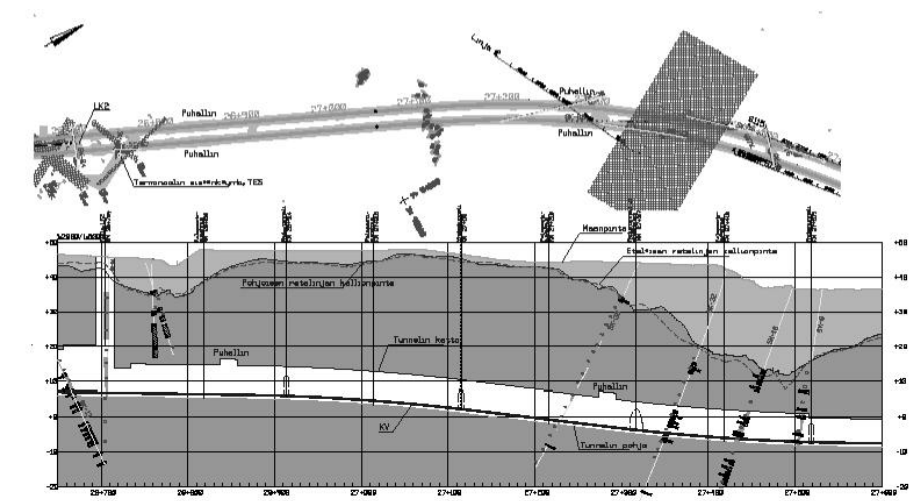
Suurten taivutusmomenttien vuoksi kiinnitysosat ovat hyvin suuria. Teräksinen kiinnityslevy on 190 mm leveä, 535 mm korkea ja 20 mm paksu sekä painaa 16,0 kg. Lisäksi kiinnityspultit painavat 2,0 kg kappale. Suuren painonsa vuoksi liitoskappaleiden asennus on todettu työmaalla hankalaksi. Etenkin tunnelin ahtaassa väliatilassa, seinä- ja kattoelementin saumassa, jossa kiinnitysosa asennetaan tikkailta. [1; 3.]

4 Asennus

4.1 Asennukseen liittyvät ongelmat

4.1.1 Radan geometria

Radan geometria tuottaa elementtien asennettavuudessa hankaluutta sekä pysty- että vaakasuunnassa. Radan suurin kaltevuus on noin 3 %, jolloin yhden elementin matkalla elementti voi kallistua noin 70 mm. Liikennevirasto on asettanut pystytason pyöristyssäteen minimiarvoksi 10 000 m. Radan kallistusten muutokset aiheuttavat elementtien pystysaumoihin leveyseroja elementtien ylä- ja alapäiden välille. Elementit on mitattu paikoilleen KV-tasolla, jolloin radan kaltevuuden aiheuttamat heitot ilmenevät seinäelementtien yläpäässä. Kriittisin tilanne syntyy silloin, kun ratalinja kulkee ns. kuopassa, jolloin on riski, että seinäelementit osuvat yläpäästä yhteen. Tämä aiheuttaa seinä- ja kattoelementtien kiinnityskohtiin eroja, jolloin on mahdollista, että liitosten toleranssi ylittyy. [4, s. 9; 5.]



Kuva 16. Haitta-ainealueen tasopiirustus ja pitkittäisleikkaus. [1.]

Vierekkäiset seinä- ja kattoelementit kiinnitetään toisiinsa levy-pultti-liitoksella, jossa tappien asennustoleranssi on 30 mm. Koska radan kaltevuuskulma vaihtelee yhden elementin matkalla 0-70 mm, voi elementtien nurkkien erot hankaloittaa liitoksien paikoilleen saantia. Etenkin kattoelementtien kohdalla, joiden nosto on hankalampaa, liitosten asennus voi tuottaa vaikeuksia. [1.]

Kaltevuuden lisäksi Kehärata kaartuu haitta-alueen itäpäässä. Haitta-alueella radan suurin kaarresäde on noin 1 000 m, joka on Liikenneviraston suosittelema minimiarvo nopeudelle 120 km/h. Ehdoton minimi kaarresäde nopeudelle 120 km/h on 800 m. Tämä aiheuttaa ratatunnelin sisä- ja ulkokaaren seinäelementtien saumoihin toleranssieroja, joiden vuoksi elementtien mallintaminen ja asentaminen hankaloituu. Radan kaartuminen voi aiheuttaa liitoskohtiin myös hammastuksia, koska seinäelementit ovat suorina, mutta paikalla valettu pohjalaatta saattaa olla kaareva. Hammastukset on otettava myös huomioon ratalinjan ja seinäelementtien turvaetäisyyksiä suunniteltaessa. Tämä on yksi syy, minkä takia elementtejä ei ole suunniteltu leveämmiksi kuin 2470 mm. Haitta-alueen länsipää, jossa ratalinja kulkee suoraan, on yksinkertaisempi mallintaa tarkasti ja toteuttaa. [4, s. 7-10; 5.]

Liikennevirasto on asettanut tarkat suunnitteluvaatimukset radan geometrialle. Rata on määrätty rakennettavaksi perinteisten ratojen yhteentoimivuusdirektiivin teknisten eritelmien mukaisesti. Tällöin noudatettavia yhteen toimivuuden teknisiä eritelmiä ovat tunneliturvallisuus, esteettömyys, ohjaus-, hallinta- ja merkinanto-osajärjestelmä soveltuvin osin. Nopeudelle 80 km/h suositellaan kaarresäteen minimiarvoksi 600 m [4, s. 4, 8.]

4.1.2 Rakenteista johtuvat ongelmat

Erilaiset rakenteet, kuten paikalla valettu pohjalaatta, seinäelementit ja kaarevat kattoelementit, hankaloittavat asentamista. Pohjalaatan ja seinäelementtien sekä seinä- ja kattoelementtien liitoskohtien on osuttava kohdakkain, jotta kiinnitysosat on mahdollista asentaa. Lisäksi tunnelin vastakkaisten seinäelementtien on oltava ristimitassa, jotta kaareva kattoelementti saadaan paikoilleen. Seinäelementtejä asennettaessa on tärkeää, että niiden nurkkapisteen koordinaatit mitataan tarkasti työmaalla. Seinäelementteihin vaikuttaa myös pohjalaatan rakenne. [5.]

Seinäelementtien tarkka asennus vaikeutuu tunnelin kaarevalla osuudella. Paikalle valettu pohjalaatta on mahdollista tehdä usealla erilaisella muotilla. Jos pohjalaatta valetaan kaarevana, se on muottien tekemisen kannalta nopeampaa, mutta seinäelementtien asennettavuuden kannalta epävarmempaa. Pohjalaatta on myös mahdollista tehdä suorilla, elementin mittaisilla, valumuoteilla. Näin elementtien ja pohjalaatan liitoskohtien sovittaminen helpottuu ja mahdollinen ero ilmenee elementtien saumassa. Kulmittainen pohjalaatan valu on mahdollista toteuttaa rakennepiirustuksissa annettuiden koordinaattien avulla. Se on kuitenkin työmaan kannalta hankalampaa ja tarkkuuden vuoksi hitaampi. [5.]

Yhdyskäytävien kohdalla on jouduttu tekemään vakioimitasta poikkeavia seinäelementtejä, jotta seinäelementit on saatu kulkemaan vastakkain. Normaalmittainen elementti on kiinnitetty ala- ja yläosasta kahdella kiinnitysosalla. Joihinkin pidennettyihin seinäelementteihin joudutaan mahdollisesti asentamaan kolme kiinnikettä sekä ala- että yläosaan. Tällöin ongelmaksi syntyy liitoskohtien raudoitusten mahtuminen elementtiin ja pohjalaattaan. Vastaava ongelma voi syntyä myös kahden kiinnikkeen kanssa, jos elementti on huomattavasti normaalia lyhyempi. Normaalista poikkeavia elementtejä on suhteessa elementtien kokonaismäärään vähän. Normaalista pidempien tai lyhyempien elementtien liitoskohdat on suunniteltava tapauskohtaisesti ja varmistettava lisäraudoituksen sopivuus. Tavallisessa tilanteessa liitoksen keskikohta on 610 mm päässä elementin reunasta. [5.]

4.1.3 Rakenteiden yhteensovittaminen

Elementtien ja paikallavalurakenteiden yhteensovittamista hankaloittaa monet eri tekijät. Paikalla valettujen rakenteiden mittatoleranssit ovat valmiita elementtejä suuremmat. Rakenteiden liitoskohtiin tulevat syvennykset ja asennusreiät on helppo tehdä mittatarkasti elementteihin tehtaalla. Pohjalaattaan ja muihin paikallavalurakenteisiin syvennykset ja asennusreiät on kuitenkin vaikea tehdä mittatarkasti oikealle paikalle.

Paikalla valettujen rakenteiden liitoskohtien syvennykset ja asennusreiät on mahdollista toteuttaa muottivaluna tai jälkikäteen poraamalla. Kummassakin vaihtoehdossa on omat riskinsä. Jos syvennykset ja reiät toteutetaan muottivaluna, on riskinä, että muotissa käytetty muottirasva estää injektoinnin tarttumisen betonivaluun. Reiän muottivalussa mahdollisesti käytettävää teräsputkea ei saa jättää valun jälkeen paikoilleen. Reiän pinta tulee puhdistaa harjauksella ja vesihuuhtelulla, jotta injektointi muodostaa

pultin ympärille yhtenäisen betonikerroksen. Jos reiät porataan betonirakenteeseen jälkikäteen, reiät on puhdistettava hyvin betonipölystä ja tarvittaessa vesihuuhdeltava, jotta injektointimassa tarttuu rakenteeseen. Liitoskohdat saattavat tarvita myös lisäraudoitusta, joka on vaikea sijoittaa oikein betonivaluun, jos reiät tehdään jälkikäteen. Lisäraudoitus ja injektointiletkut on helppo sijoittaa muottivaluun. Elementtitunnelin betonirakenteisiin on hyvin vaikeaa tai mahdotonta tehdä jälkikäteen toimivaa injektointijärjestelmää. [5.]

Jos paikalla valettu pohjalaatta tehdään pitkälle valmiiksi ennen seinäelementtien asennusta, on riskinä, etteivät seinäelementtien liitoskohdat osu niille paikallavalussa varattuihin paikkoihin. Paikallavalun epätarkkuudet liitoskohdissa pienentävät entistään kiinnitysosien asennustoleransseja. Myös kalliotunnelin rajallinen tila hankaloittaa rakenteiden yhteensovittamista, etenkin seinä- ja kaarielementtien paikalle nostovaiheessa. Seinä- ja kattoelementit on tuettava hyvin asennusvaiheessa, kunnes liitokset pystyvät vastaanottamaan niille kohdistuvat rasitukset.

4.1.4 Elementtien asennusolosuhteet

Kalliotunnelissa työskenneltäessä on otettava huomioon, että asennusolosuhteet eivät vastaa normaalia ulkoilmaa. Tunnelin kosteuspitoisuus on suurempi ulkoilmaan verrattuna. Kosteus on otettava huomioon elementtien säilytyksessä, asennuksessa ja erityisesti elementtien liitosten injektoinnissa. Haitta-ainealueella on myös veden mukana kulkeutuneita haitta-aineita, jotka on otettava huomioon suunnittelussa. Asennussuunnitelmassa vaaditaan selvitys, miten injektointi toteutetaan. Injektointimassan ja betonin kovettumista hidastaa myös tunnelissa vallitseva suhteellisen alhainen lämpötila. Tunnelissa vallitsee vakaa noin 7-8 °C:n lämpötila. Toisaalta tasainen lämpötila helpottaa betonoinnin ja elementtien asennuksen suunnittelua. Kosteus myös vähentää teräsbetonirakenteiden virumaa ja kutistumaa. [5.]

Suurin ongelma tunneleita rakentaessa on tilan puute. Kalliotunnelit ovat ahtaita ja kuljetus- ja nostokalustolle tilaa on rajallisesti. Pohjalaattaa valettaessa tunneliin on mahdollista lisäksi betoninkuljetus ja pumppuauto. Elementit suuri koko tuottaa kuljetuksen kannalta vaikeuksia. Seinäelementit ovat korkeita ja suurin osa kattoelementeistä koko betonitunnelin levyisiä. Elementtien kuljettaminen tunnelin suuaukolta veisi liian kauan ja viivästyttäisi turhaan työmaata. Tästä syystä elementit on päätetty laskea tunneliin Vesikujan pystykuilun kautta. Kuljetuskalusto vie lähes koko tilan tunnelissa, jolloin

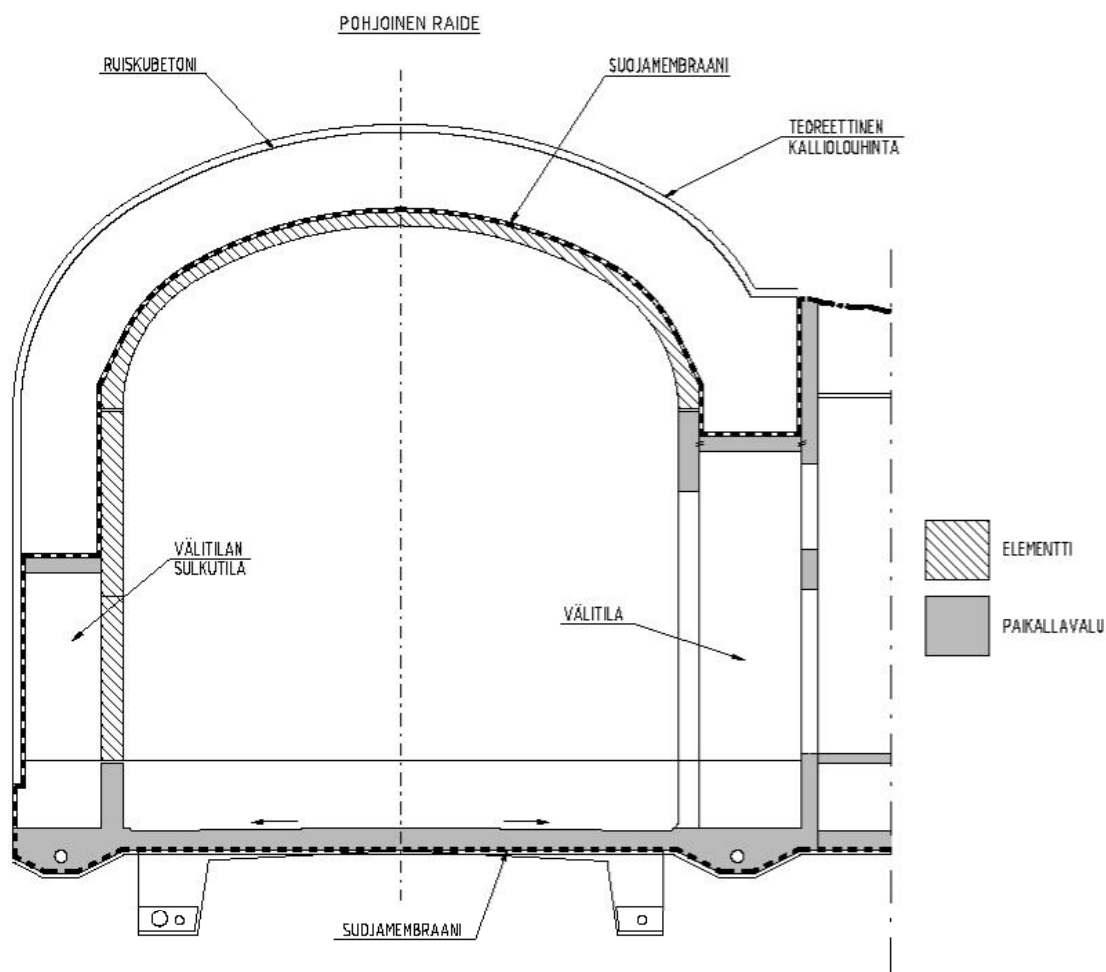
työkoneiden ohitukset tuottavat ongelmia. Lisäksi seinäelementtien asennustuenta pienentää elementtitunnelin sisämittaa entisestään.

Elementtejä asennettaessa on tilan kannalta kaksi eri ongelmavaihetta, seinä- ja kattoelementtien paikalle nosto. Seinäelementit nostetaan paikoilleen nostolenkeistä nosturilla, jolloin nosturi vaatii tietyn asennustilan kalliotunnelissa pystysuunnassa. Kalliolouhinnan ja elementtitunnelin välissä, niin sanotussa välitilassa, ahtaus hankaloittaa tunnelin liitoksien ja suojamembraanin asentamista sekä huoltotoimenpiteitä. Kaarielementtejä asennettaessa ongelmaksi syntyy tunnelin yläpuolella elementin paikalleen noston vaatima tila ja tunnelin sisällä nostolavetin suuri koko. Seinäelementtien asennus- ja nostoaikainen vinotuenta on suunniteltu niin, että nostolavetti mahtuu kulkemaan niiden välistä. Elementtien kuljetus ja nosto on määritelty tarkasti elementtien asennussuunnitelmassa. Elementtitunnelin yläpuolinen ahtaus hankaloittaa myös kaarielementin päälle asennettavan suojamembraanin asentamista. [5.]

4.1.5 Elementtien ja suojamembraanin asennuksen yhdistäminen

Suojamembraanin tarkoitus on suojata elementtitunnelin teräs- ja betonirakenteita haitta-aineilta. Membraanin on tarkoitus muodostaa haitta-ainealueella koko tunnelirakenteen ympäröivä yhtenäinen vesi- ja kaasutiivis suojarakenne. Tunnelin seinä- ja katto-osuudella suojakalvo asennetaan rakenteen ulkopintaan ja alapuolella pohjalaatan alle.

Aluksi normaalille tunneliosuudelle ja yhdystunneleille harkittiin kahden eri suojamembraanin käyttöä. Yhdystunnelit ovat huomattavasti monimutkaisempi rakenne kuin tunneliosuudet ja vaativat membraaniin useita eri taitoskohtia. Tunneliosuudelle harkittiin JUNIFOL T LLDPE -geomembraani. Tuotteen nimellispaksuus on 2,2 mm. JUNIFOL T LLDPE:n heikkoutena on sen enimmäistaivutuskulman rajautuminen 50 asteeseen. Yhdystunneleiden kohdalle harkittiin suojarakenteeksi niiden monimutkaisemman rakenteen vuoksi Mapelan-suojakalvo. Mapelan soveltuu paremmin monimutkaisten rakenteiden suojaamiseen, kuten tunneleiden ja kalliotilojen erikoisrakenteisiin. Kolmas vertailussa mukana ollut suojamembraani oli Carbofol. Lopulta urakoitsijan toivomuksesta päädyttiin JUNIFOL-geomembraanin käyttöön kaikissa rakenteissa. [7.]



Kuva 17. Periaateleikkaus pohjoisen raiteen suojamembraanista yhdystunnelin kohdalla. [1.]

Tunnelin alapuolella membraani tukeutuu tasausvalun ja paikalla valettavan pohjalaatan väliin. Membraanin pohjaosuus on siis asennettava aina ennen pohjalaatan valamista. Sekä asennusvaiheessa että käytön aikana on riski, että membraani vioittuu ja siihen syntyy vuotokohtia. Suojakalvoa asennettaessa tasausbetonin päälle ja pohjalaatan muottivalua tehtäessä on suurin riski suojakalvon vioittumiselle. Pohjalaatan alle jäävä suojakalvo on membraanirakenteen vaikein kohta korjata jälkikäteen. Tästä johtuen sitä asennettaessa on käytettävä erityistä varovaisuutta ja suojattava suojakalvo ylä- ja alapuolelta geotekstiilillä. Kun pohjalaatta on valettu suojakalvon päälle onnistuneesti, myös laatta suojaa membraania. Pohjalaatan alla oleva membraani kestää myös elementtien asennuksessa vaadittavien nosto- ja kuljetuskoneiden aiheuttamat kuormat. Suojakalvon tiiveys pohjalaatan ja seinän välisessä liitoksessa tulee myös varmistaa. Suojakalvon tiiveys varmistetaan paineistamalla. Mapelan-geomembraanin rajallinen taivutuskulma, 50° , asettaa vaikeuksia asennukselle esimerkiksi pohjalaatan ja tunneliseinän sauman kohdalla. [8, s. 13-17.]

Suojamembraania asennettaessa tunnelin seinä- tai katto-osuudelle ei ole suurta riskiä, että suojamembraani vaurioituisi asennuksessa huomaamatta. Membraani itsessään on väriltään mustaa, mutta membraanin ulkopinnassa on ohut valkoinen muovikalvo. Vaurioituneet kohdat näkyvät valkoisessa pinnassa selvästi, jos membraanin pinta vioittuu. Seinä- ja kattoelementtien päällinen suojakalvo voi vaurioitua ruiskubetonista mahdollisesti ajan myötä putoavien kappaleiden takia. Haitta-aine voi ajan myötä vahingoittaa kalliopintaan ruiskutettua betonia, jolloin haurastumisen johdosta ruiskubetoni saattaa irtolla. Suojakalvon katto-osuudella putoamisriski on pienempi, sillä kalliopinnan yläosaan asetetun verkon tulisi estää suurten lohcareiden putoaminen. Riskialttiimpia putoaville palasille ovat suojakalvon seinäosuus ja välitilan betonikouru. [8, s. 18-19.]

Suojamembraanin toimivuuden kannalta on tärkeää, että membraania ei jouduta puhkaisemaan missään kohtaa rakennetta. Monet rata- ja talotekniikan kannakkeiden tartunnat, kuten kiintoajojohtimen asennuskannakkeet, vaativat kiinnitystä tunnelirakenteeseen. Elementtitunneli mahdollistaa tartuntojen teon kiinnikkeitä varten jo elementti-tehtaalla, jolloin asennustyöt työmaalla nopeutuvat ja membraanin puhkaus vaaraa ei ole. Koska seinäelementit ovat 270 mm paksuja ja kattoelementit ohuimmillaan 180 mm, riski, että asennusvaiheessa porattaisiin elementin läpi membraaniin, on pieni. [8, s. 11-19.]

Työmaan kannalta olisi tehokkainta, jos membraanin asennus tunnelin seinä- ja katto-osuudelle tehtäisi mahdollisimman katkottomasti. Välitilan ahtaus rajoittaa kuitenkin membraanin asennuksessa tarvittavien laitteiden, kuten hitsauskoneiden, kuljettamista pitkiä matkoja asennuspaikalle. Elementtitunnelin edetessä on varmistettava, että membraanin asennus on jälkikäteen mahdollista tehdä. Lisäksi elementtejä asennettaessa on varottava, että pohjalaatan alle asennettu membraani ei pääse vahingoittumaan. Membraani ei myöskään saa vioittua mahdollisista elementtien asennuksesta syntyvistä liikkeistä. [5.]

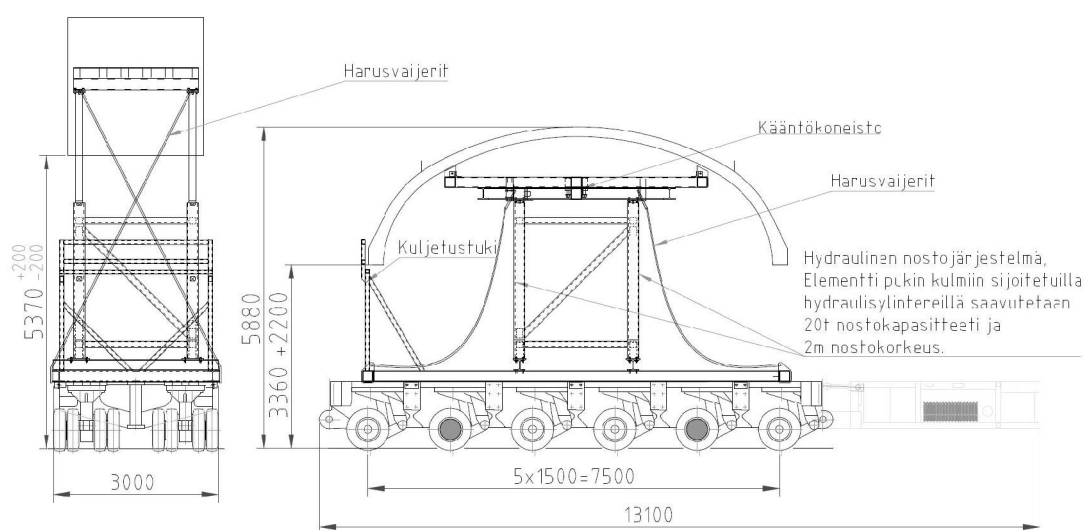
Työmaan on tarkoitus jättää membraanirullia välitilaan tasaisin välein elementtitunnelia asennettaessa. Näin rullia ei tarvitse kuljettaa pitkiä matkoja jälkikäteen ahtaassa välitilassa. Membraani on tarkoitus vetää tunnelin yli elementtitunnelin toiselta puolelta toiselle. [3.]

4.1.6 Elementtien kuljetus ja nosto

Seinäelementit on päätetty valmistaa Suomessa. Kaarielementit valmistetaan Suomen ulkopuolella. Mitä pidempi kuljetusmatka elementeillä on, sitä suurempi on riski, että viivästynyt kuljetus viivästyttää työmaata. Yhtenä vaihtoehtona on elementtien väliaikaisvarastointi Suomessa, elementtitehtaalla. [6.]

Työmaalla seinäelementit on tarkoitus varastoida kampafakissa ja kaarielementit niille erikseen suunnitelluissa alustapukeissa. Kaarielementit toimitetaan työmaalle kahden kappaleen kuormassa ja toinen elementeistä nostetaan varastoon alustapukeille. Työmaalla ei yleensä säilytetä ylimääräisiä elementtejä rajallisen tilan ja kustannuksien vuoksi. Kaikki elementit tarkastetaan silmämääräisesti, kun ne tulevat työmaalle. [9.]

Elementit lasketaan alas tunneliin Vesikujan kuilun kautta. Vesikujan nostoissa käytettävä nosturi on autonosturi Liebherr LTM 1200. Kaarielementit kuljetetaan ja varastoidaan elementtitehtaalla työmaalle päällekkäin. Kaarielementtien kuljetusauto vastaa massaltaan tavallista sora-autoa. Kaarielementtien asennusta varten on suunniteltu erillinen asennuslavetti. Lavetti on kokonaispituudeltaan 13,1 m ja leveydeltään 3,0 m. Lavetti painaa 310 kN, lavetin päällä oleva elementtipukki painaa 150 kN ja kaarielementin on laskettu painavan 120 kN. Näin kaluston kokonaiskuormaksi tulee 580 kN. Jotta pohjalaatta ei kohdistuisi suuria pistekuormia, on lavetin paino jaettu kuuden akselin varaan. Näin yhden akselin akselimassaksi tulee 97 kN. Alustan poikittaisskallevuus saa olla enimmissään 6 %. [8, s. 18; 9; 10; 11.]



Kuva 18. Kaarielementtien kuljetuslavetti. [11.]

Kaarielementit nostetaan ilmaan hydraulisella nostojärjestelmällä. Koska kaarielementit ovat leveydeltään koko elementtitunnelin levyisiä, joudutaan ne kuljettamaan tunnelin sisällä asennuspaikalle pitkittäin. Nostojärjestelmän päällä on kääntökoneisto, joka mahdollistaa elementin kääntämisen lavetin päällä. Hydraulisylintereillä on mahdollista nostaa 20 t kuorma 2 m korkeuteen. [11.]

Kaarielementit on mahdollista siirtää kuljetusautolta asennuslavetille kahdella eri tavalla. Kuljetusauto voi peruuttaa elementtinosturin eteen, jolloin nosturi nostaa elementin ilmaan. Tämän jälkeen kuljetusauto ajaa pois nosturin edestä ja asennuslavetti ajaa nosturin eteen, jolloin nosturi laskee elementin lavetille. Kuljetusauto ja nostolavetti voivat myös peruuttaa nosturin eteen rinnakkain, jolloin nosturi voi nostaa elementin suoraan kuljetusautolta lavetille. Jälkimmäinen vaihtoehto on kuitenkin tunnelissa ahtaampi eikä se ole mahdollista silloin, kun kohdalla on seinäelementtien vinotukia. [9.]



Kuva 19. Elementtinosturi kuljettaa kaarielementtiä asennuspaikalla. [12.]

Seinäelementit kuljetetaan tunnelissa Hiab-autolla, jonka jälkeen nostetaan pohjalaatan seinämän päälle autossa olevan nosturin avulla. Elementit lasketaan kuilusta Hiab-autolle vaaka-asentoon, josta ne nostetaan yläpään kautta pystyasentoon asennuspaikalla asennusta varten. Suuren korkeutensa vuoksi seinäelementit varastoidaan kyljelleen. Elementtien kuljetusta ja nostoa suunniteltaessa on tärkeää ottaa huomioon rakenteiden, kuten pohjalaatan, kestävyys ja läpileikkautuminen. Käytön aikaiset kuormat voivat usein olla huomattavasti pienempiä kuin asennuksen aikaiset kuormat. Kuorma

on jaettu mahdollisimman laajalle lavetin renkaiden avulla, että pohjalaattaan ei kohdistuisi yksittäisiä suuria pistekuormia. Elementtinosturin tukijalkojen pohjalaattaan aiheuttamia kuormia on tasattu aluslevyjen avulla. Alun perin kaarielementit oli tarkoitus kuljettaa tunnelissa lavetilla, mutta sen hitaan liikkuvuuden ja työmaan tehokkuuden vuoksi päätettiin käyttää erillistä kuljetuskalustoa. [6; 8, s. 18; 9; 10.]

Elementtejä kuljetettaessa ja nostettaessa on suuri riski, että elementit liikkuvat ja niihin syntyy halkeamia. Seinäelementit nostetaan kahdesta nostolenkistä. Jos toinen nostolenkeistä pettää, on olemassa onnettomuusriski, että toisen lenkin kapasiteetti ei riitä vaan elementti putoaa. Kaarielementit nostetaan nelipistenostona kuormantasauslevyillä. Seinä- ja kaarielementtejä nostettaessa paikalleen liitokset eivät vielä ole tukemassa rakennetta. Ennen kuin liitoskappaleet on kiinnitetty ja injektointimassa kuivunut, on kaikki elementit tuettava paikoilleen. Elementtien asennusaikainen tuenta on mitoitettu kestäämään elementtien omapainon sekä nostosta ja asennuksesta aiheutuvat kuormat, mutta ei onnettomuuskuormia. Onnettomuuskuormia ovat esimerkiksi nosturin törmäminen tukeen. Elementtien paikalleen nosto aiheuttaa myös liitoksiin rasituksia. Jos seinäelementtien ja pohjalaatan liitosten injektointi on tehty ennen kuin kaarielementit nostetaan paikoilleen, on riski, että nostosta aiheutuvat rasitukset vioittavat liitosten injektointia. Jos seinäelementtejä ei tueta asennuksen aikana, on riski, että painavat elementit kaatuvat tai eivät pysy riittävän paikoillaan, jotta kiinnitysosat voitaisiin asentaa. Kattoelementit nostetaan seinäelementtien päälle alhaaltapäin, jolloin kaarielementin omapaino aiheuttaa vetorasituksia elementin yläpintaan. Kaarevia kattoelementtejä nostettaessa on riski, että elementin yläpintaan syntyy halkeamia. [6.]

Tunnelia asennettaessa käytettävä tila on rajallinen. Suuret nosto- ja kuljetuskalustot vaativat paljon tilaa liikkuaan. Laitteiden on myös pystyttävä ohittamaan toisensa tunnelin sisällä. Lisäksi seinien tuenta pienentää entisestään tunnelin rajallista tilaa. Elementtien asennusjärjestys on suunniteltava tarkkaan, jotta se on mahdollista toteuttaa. Yksinkertaisinta olisi, jos ensin asennettaisiin paikoilleen seinäelementit ja sen jälkeen kattoelementit. Rajallisen tilan vuoksi tämä ei kuitenkaan ole mahdollista. Jos taas asennetaan vuorotellen seinä- ja kattoelementtejä, työmaa etenee hitaasti ja odotusajat ovat pitkiä.

annettu KV-tasolla. Elementtien välinen leikkauspiste saadaan mitattua sauman keskin linjan ja pohjalaatan seinämän risteyskohdasta. Z-koordinaatit on tarkastettu 3D-mallista. Ratalinjalla annettujen pisteiden välinen suora etäisyys on 2500 mm ja elementtisaumojen leveys 30 mm. Koordinaatit on todettu työmaalla toimiviksi ja niiden mittaaminen on ollut nopeaa. Kaikkien asennettujen elementtien sijainti on tarkemittattu. Näin työmaa on varmistunut, että seinäelementteihin ei synny sijaintipoikkeamia ja kaarielementit on mahdollista asentaa niiden päälle jälkikäteen. [1; 5; 3.]

Radan kaltevuuden muutokset ovat lyhyellä matkalla melko pienet. Tästä johtuen elementtien teoreettinen sauman leveys, 30 mm, tulisi riittää estämään seinä- ja kattoelementtien kiilautumisen yhteen. Elementtien tarkoilla koordinaateilla ja kiinnitysosien 30 mm asennustoleranssilla on todettu elementtien asentaminen teoriassa mahdolliseksi. Myös urakoitsija on todennut koeasennuksissa elementtien asennuksen toimivan suunnitelmien mukaan. Radan kaartumisen aiheuttamaa pohjalaatan ja seinäelementtien välistä hammastusta on estetty kasvamasta liian suureksi elementtien tarpeeksi pienillä leveyksillä.

Elementtien tarkkojen koordinaattipisteiden saaminen työmaalle on välttämätöntä elementtien asentamisen kannalta. Ilman tarkkoja koordinaatteja on riski, että elementtien asennusvaiheessa suunnitellut elementtien saumavälit eivät toteudu. Sekä membraanin asennettavuuden, että liitosten toiminnan kannalta on tärkeää ettei elementtien saumoihin synny suunniteltuja toleransseja suurempia eroja. Kehäradan aikaisemmilla tunneliosuuksilla alareunaelementtejä asennettaessa on havaittu jo noin 400 mm eroja elementeille annetuissa koordinaateissa. Edellä mainitun taulukon avulla asentajien on työmaalla mahdollista merkitään elementtien tarkat sijainnit. Kattoelementtien tulisi olla seinäelementtien kanssa samassa linjassa, jolloin ainoastaan z-koordinaatti muuttuu.

4.2.2 Rakenteellisten ongelmien ratkaisu

Elementtitunnelin rakentaminen on aloitettu kaarevalta eli vaikeammalta osuudelta. Paikalle valettujen pohjalaattojen valumuotteina on päätetty käyttää järjestelmämuotteja. Järjestelmämuotit on todettu hyvin toimiviksi työmaalla. Seinäelementtien asentamisen mahdollistamiseksi pohjalaatta on valettu yhden elementin mittaisina suorina valuna eikä kaarevana. [3.]

Urakoitsija oli sitä mieltä, että toteutuspiirustuksissa annettujen koordinaattien avulla elementtien saumakohtien mittaaminen oikeisiin paikkoihin oli helppoa ja nopeaa. Haastatteluiden perusteella pohjalaatan sokkelin tarkka mittaus on välttämätöntä, jotta seinäelementit saadaan paikoilleen. Lisäksi seinäelementtiä leveämpi sokkeli on helpottanut asennusta. Suurimmat sallitut mittapoikkeamat työmaalla ovat olleet 5 mm. [3.]

Jokainen vastakkainen seinäelementti on myös mitattu keskenään ristimittaa. Koska paikallavalusokkelin nurkkapisteet mitataan tarkasti paikalleen, saadaan seinäelementit helposti ristimitaan. Kaarielementtien koeasennuksessa ei havaittu ongelmia elementtien yhteensovittamisen kanssa. [3.]

Tässä vaiheessa pohjalaattaa on valettu työmaalla jo ensimmäisen yhdystunnelin ohi. Liitoskohtien raudoitukset on mitattu yhdystunnelin kohdalla paikoilleen ja saatu mahtumaan. Tässä vaiheessa kaikki liitoskohtien lisäraudoitukset on saatu mahtumaan pohjalaatan sokkeliin. Suurin osa yhdystunneleiden kohdista on vielä valamatta, mutta teoriassa lisäraudoitteiden tulisi mahtua sokkeliin. [3.]

4.2.3 Rakenteiden yhteensovittaminen

Paikalla valettavien rakenteiden liitoskohtien syvennykset todettiin helpoimmaksi toteuttaa muottivaluna. Liitoskohtien syvennyksien tartuntapinnan toimivuus injektoitaessa ei ole niin kriittinen, kuin kiinnitysosien asennusreikiä injektoitaessa. Lisäksi syvennyksin toteutus valun jälkeen on hyvin hankalaa. Myös injektointiletkut todettiin helpoimmaksi asentaa valun aikana, jolloin ne on mahdollista kiinnittää muottiin. Työmaalla valumuotien käyttö liitoskohtien syvennyksissä todettiin toimivaksi ratkaisuksi. Injektointi letkujen toimivuus ennen liitoskappaleiden asentamista on varmistettu puhaltamalla ilmaa. [3; 5.]

Sekä sileä, että karheapintainen teräsputki asennusreikien muottina, todettiin toimimattomaksi. Ongelmaksi tuli teräsputkea ympäröivän betonivalun kutistuminen kuivuesa-
saan. Kutistuessaan betoni irtoaa teräsputkesta, jolloin liitos ei muodosta enää yhtenäistä rakennetta eikä vastaanota sille kohdistuvia rasituksia. Lisäksi injektointiputkien saaminen teräsmuotteihin on liian hankalaa. Teräsmuottiin tulisi tehdä erillinen läpivientireikä injektointiputkea varten sekä injektointiputken tulisi pysyä puhtaana paikallavalun ajan. [5.]



Kuva 21. Paikalla valetun sokkelin liitoskohdan syvennys, porareikä ja injektointiletkut.

Urakoitsija oli sitä mieltä, että vastaavaa solumuovimuottia jota seinäelementeissä käytetään tehtaalla, olisi mahdollista käyttää myös työmaalla. Urakoitsija oli kuitenkin käyttänyt timanttiporausta vastaavanlaisissa aikaisemmissa kohteissaan ja todennut sen toimivaksi ja nopeaksi. Lisäksi porareiän jälkipuhdistus on helpompaa kuin muottivalun öljyjen poisto. [3.]

Asennusreiät päätettiin toteuttaa paikallavaluun jälkikäteen. Reikien jälkikäteen poraukseen hyväksyttiin vain timanttiporaus. Koska asennusreikä on halkaisijaltaan 60 mm, voisi sen poraaminen iskuporalla aiheuttaa paikallavalusaumoihin liian suuria rasituksia ja halkeamia. Timanttipora on tuettava tukevasti pohjalaattaan sekä paikallavalu seinämiin, jotta poraaminen ei aiheuta saumoihin rasitusta. Liitoskohdat vaativat lisäksi lisäraudoitusta. Lisäraudoitusten sijainti mitataan tarkasti paikallavaluun ja asennusreikien paikat merkitään erillisillä merkeillä, jotta jälkiporaus on mahdollista tehdä. Työmaa oli saanut reikien sijainnit mitattua helposti paikoilleen toteutuspiirustusten koordinaattien avulla. Asennusreiät on puhdistettava betonipölystä ja epäpuhtauksista ennen injektointia, jotta injektointilaasti imeytyisi betoniin. Reikien puhdistaminen on suoritettu puhaltamalla. [3; 5.]

Elementeille annetuilla tarkoilla koordinaateilla mahdollistetaan pohjalaatan valaminen ja asennusreikien poraaminen pitkälle etukäteen. Se edellyttää kuitenkin työmaalla tarkkuutta ja virheettömyyttä mittausten suhteen. Työmaan mielestä liitoksille ja elementeille varatut asennustoleranssit ovat olleet riittävät. [3.]

Seinä- ja kaarielementtien koeasennusten perusteella tunnelissa on riittävästi tilaa nostoille ja asennuksille. Tunnelirakentamisessa on otettava huomioon tiettyjä hidastavia tekijöitä verrattuna esimerkiksi talonrakentamiseen. Elementtien lasku tunneliin ja materiaalien kuljetus on hidasta. Ahtaat tilat vaativat työmaalta erityistä tarkkaavaisuutta. Tunnelissa käytettävät kuljetus- ja nostokalustot ovat isoja ja asennustilaa pienentää entisestään seinäelementtien vinoutu. Kuitenkin urakoitsija oli sitä mieltä, että suunniteltua asennustilaa on riittävästi ja tunneli on täysin toteutettavissa asennussuunnitelman mukaan. [3.]

4.2.4 Elementtien asennusolosuhteet

Injektointeja ja paikallavaluja suunnittelua helpottaa tunnelissa vallitseva tasainen lämpötila. Tunneleiden välitiloihin on tehty vedenpoistokourut mahdollisia kosteuskertymiä varten. Paikallavalurakenteita tehdessä on varmistettava, että rakenteet eivät ole liikaa suoranaيسessa kosketuksessa haitta-aineiden kanssa. Tunnelissa vallitseva kosteus on otettava huomioon elementtien asennussuunnitelmaa tehtäessä. Liitoksien injektoinnin kannalta kosteus on kriittisin riski. Injektointiaineen kovettumiseen vaikuttava kosteus on otettu huomioon injektointimassaa valittaessa. Asennussuunnitelmassa on erikseen mainittava, miten injektointi toteutetaan.

Elementtitunnelin mahdollistamiseksi haitta-ainealueen kalliotunneliin on suoritettu lisälouhintaa. Louhintaa on suunniteltu niin, että elementtitunnelin ja kalliolouhinnan väliin jäävän tilan vähimmäisetäisyys on 800–1 000 mm. Tämä mahdollistaa elementtien, liitosten ja suojamembraanin asennuksen sekä käytönaikaiset huoltotoimenpiteet. Rajallisen tilan vuoksi kaarielementtien nostamiseen on suunniteltu erillinen lavetti, joka nostaa elementit paikoilleen altapäin.



Kuva 22. Seinäelementtien vinotuenta.

Seinäelementtien asennusaikainen tuenta on päätetty toteuttaa vinotuilla pohjalaatasta, elementtitunnelin sisäpuolelta. Tämä kuitenkin rajoittaa työskentelyä tunnelin sisällä, minkä vuoksi tunneli on päätetty asentaa paloittain. Tämä mahdollistaa vinotukien poiston, kun liitosten injektointi on kuivunut, jolloin nosto- ja kuljetuskoneille vapautuu lisää tilaa. Jotta kaarielementtien kuljetuslavetille on saatu riittävä tila tunnelissa, on seinäelementtien vinotuenta jouduttu toteuttamaan normaalia jyrkemmässä kulmassa. Jyrkän kulman vuoksi vinotukia on asennettu normaalia tiheämmin ja tukien kiinnityspultteja on kasvatettu. Pohjalaattaan vinotuet kiinnitetään joko yhdellä M20 tai kahdella M16 lyöntiankkurilla. Seinäelementtiin tuki kiinnitetään yhteen M20 sisäkierränsäkköön. Normaalilla tunneliosuudella vinotukia asennetaan yhteen seinäelementtiin kaksi. Vinotuksi on valittu Müba-elementtituki. [3; 9.]

Leveiden tunneliosuuksien kaarielementtejäkin suunniteltiin tehtäväksi yksiosaisina. Suuret kaarielementit todettiin kuitenkin liian painaviksi ja isoiksi laskea kuilua pitkin tunneliin sekä kuljettaa ja nostaa. Tämän vuoksi leveät kaarielementit päätettiin toteuttaa kaksiosaisina. Rajallisen tilan vuoksi leveän osuuden kaarielementin harjan liitoksen asennus saattaa tuottaa vaikeuksia.



Kuva 23. Kaarielementin lasku Vesikujan kuilun koeasennuksissa. [12.]

Elementtien asentaminen on aloitettu haitta-ainealueen itäpäästä, jossa sijaitsee Vesikujan pystykuilu, josta elementit lasketaan tunneliin. Mitä pidemmälle elementtitunneli etenee, sitä pidemmäksi elementtien kuljetusmatka tulee. Työmaa harkitsee toista elementtien kuljetuspistettä, mutta sen käyttöönotto ei ole vielä varmaa. [3.]

Elementtien koeasennuksissa ei ole havaittu tilankäytön kanssa ongelmia elementtejä kuljetettaessa ja nostettaessa. Elementtejä laskettaessa tunneliin kriittisin vaihe on kaarielementit, jotka ovat 7 640 mm leveitä. Vesikujan koeasennuksissa työmaan mukaan kuilun reunoille jäi noin 1 m liikkumavaraa. Myös kuljetus- ja nostokalustolle suunniteltu tila on riittänyt asennuksissa. Seinäelementtejä nostettaessa paikoilleen nosturin nostoketjut on jouduttu pitämään pienimmällä mahdollisella pituudella. Elementit on kuitenkin voitu asentaa ilman ongelmia. Myös seinä- ja kattoelementtien liitoksien asennukselle on ollut riittävästi tilaa tunnelin välitilassa. Suojamembraani on tarkoitus vetää elementtitunnelin yli, jolloin tilan tulisi riittää myös membraanin asennukseen. [3.]

4.2.5 Elementtien ja suojamembraanin asennuksen yhdistäminen

Pohjarakenne on eristetty haitta-aineita sisältävältä vuotovedeltä betoniittimatolla ja membraanilla. Pohjalaattaa valettaessa ja valumuotteja tehtäessä työmaan on erityisesti varottava suojakalvon vioittumista. Asennusvaiheessa huomaamatta jäänyt vioittunut suojakalvo on erittäin hankala korjata ilman, että siitä syntyy haittaa junaliikenteelle. Kun pohjalaatta on kovettunut, suojaa se membraania ja laattaa voidaan kuormittaa elementtien asennusta vaativalla kalustolla. Tasausvalu on valettu ylipitkäksi elementtitunnelin reunoille, jotta se suojaisi tunnelin alta tulevaa membraania elementtitunnelin asennusaikana. Pohjalaatan alta tuleva membraani nostetaan tunneliseinälle, jolloin membraanin sauma on helposti työstettäessä ja vuotokohdat havaittavissa. Lisäksi kaikki kalvojen saumat limitetään ja hitsataan. Membraanin rajallisen taivutuskulman, 50° , vuoksi pohjalaatan pohjan ja seinämän välinen kulma viistetään 45° kulmaan. Lopuksi rakenteen tiiveys varmistetaan vielä paineistamalla. [8, s. 13-17.]

Pohjalaatan alapuoliseen membraaniin syntynyt vaurio voidaan havaita vasta, kun haitta-aine on kulkeutunut jo laatan yläpuoliseen kuivatusjärjestelmään. Suojakalvon vuoto voidaan myös havaita poikkeavan suurena vesimääränä kuivatusjärjestelmässä. Rakenteiden korjaustarpeen laajuus riippuu vahingon suuruudesta. Vahingon suuruutta voidaan tarkastaa muun muassa poraamalla betonilaattaan tarkastusreikiä. Jos vahingot ovat pieniä, voidaan vuotokohdat injektoida umpeen tarkastusrei'istä. Tällöin junaliikennettä ei ole välttämätöntä pysäyttää. Jos vahingot ovat suurempia, joudutaan pohjalaatta purkamaan sekä uusimaan suojakalvo. Pohjalaatan uusimisen yhteydessä joudutaan junaliikenne aina pysäyttämään työn ajaksi. [8, s. 17.]

Seinä- ja kattoelementtien päällisten suojakalvojen sekä välitilan betonikourun vaurioita on mahdollista tutkia ja korjata välitilan kautta. Mahdollisten vuotokohtien tarkkailu voi olla silmämääräistä tai eri mittalaitteilla tehtävää tarkkailua. Välitilassa havaittu vuoto on mahdollista korjata välitilan kautta ilman, että siitä aiheutuu haittaa junaliikenteelle. Jos tunnelin asennusaikana membraanissa havaitaan vaurioita, on ne tarkoitus paikata hitsaamalla päälle uusi pala membraania. Rataliikenne saatetaan joutua katkaisemaan, jos suojakalvon läpäissyt vuoto on ollut pitkäaikaista. Tästä johtuen rakenteen kuntoa on tarkkailtava säännöllisin väliajoin välitilasta. Kalliorappauksen ja suojakalvon kuntoa on helppo tarkkailla silmämääräisesti. Kalliorappauksesta mahdollisesti pudonneet betonipalaset on helppo havaita välitilan betonikourusta. Kalliorappausta on mahdollista vahvistaa jälkikäteen lisäverkolla. [8, s. 18-19.]



Kuva 24. Suojamembraani asennettu pohjalaatan kiinnitysriipaan saakka. [12.]

Betonielementtitunnelin sisäpuolelle on mahdollista kiinnittää kaikki junatunnelin sisäpuolelle tulevat jälkiasennukset, ilman että suojakalvoa puhkaistaan. Elementti on kantava ja mittatarkka rakenne, johon on myös helppo tehdä tunnelin asennuksen aikana jälkiasennuksia ja kiinnityksiä. Jos asennusvaiheessa huomataan, että suojamembraani on puhjennut, tiivistetään suojakalvoon syntynyt reikä välitilan puolelta. Tiivistyksen toimivuus on helppo varmistaa välitilasta sekä paineistamalla. [8, s. 11-19.]

Seinä- ja kattoelementtien asennuksesta syntyvien liikkeiden aiheuttamat vauriot suojamembraanissa on pyritty ehkäisemään asentamalla membraani vasta valmiin tunnelirakenteen päälle. Myös elementtien liitoskohtien kiinnittämisen ja injektoinnin kannalta membraania täytyy asentaa jälkikäteen. Tunnelia asennettaessa on kuitenkin huomiotava, että membraani on mahdollista asentaa jälkikäteen. Membraanien kuljettaminen, hitsauskalusto ja membraanin saumojen hitsaaminen vaativat tilaa, joka välitilassa on rajallinen. Suojamembraanista on tehty erikseen tarkempi asennussuunnitelma, jossa eritellään käytettävät materiaalit, membraanin asennus, hitsaustyöt ja käytettävät hitsauskoneet, laadun varmistus ja raportointi. Asennus on kuitenkin suunniteltava asennuspaikalla tapauskohtaisesti. [5.]

4.2.6 Elementtien kuljetus ja nosto

Työmaan tehokkuuden kannalta olisi järkevintä valaa ensin pitkä osuus pohjalaattaa, pohjalaatan kuivuttua asentaa seinäelementit järjestyksessä pohjalaatan päälle ja lopuksi kaarielementit seinäelementtien päälle. Näin välttyttäisiin kuljetus- ja nostokaluksen vaihtamisilta edestakaisin sekä saataisiin betonin kuljetus- ja pumppuautojen käyttö tehokkaaksi. Elementtien kiinnityskappaleet eivät kuitenkaan riitä asennusaikaisena tuentana vaan seinä- ja kaarielementit vaativat nosto- ja asennusaikaisen tuennan. Tunnelin- ja elementtien tuennan aiheuttaman rajallisen tilan vuoksi elementtitunnelille on laadittu tarkka portaittainen asennusjärjestys.

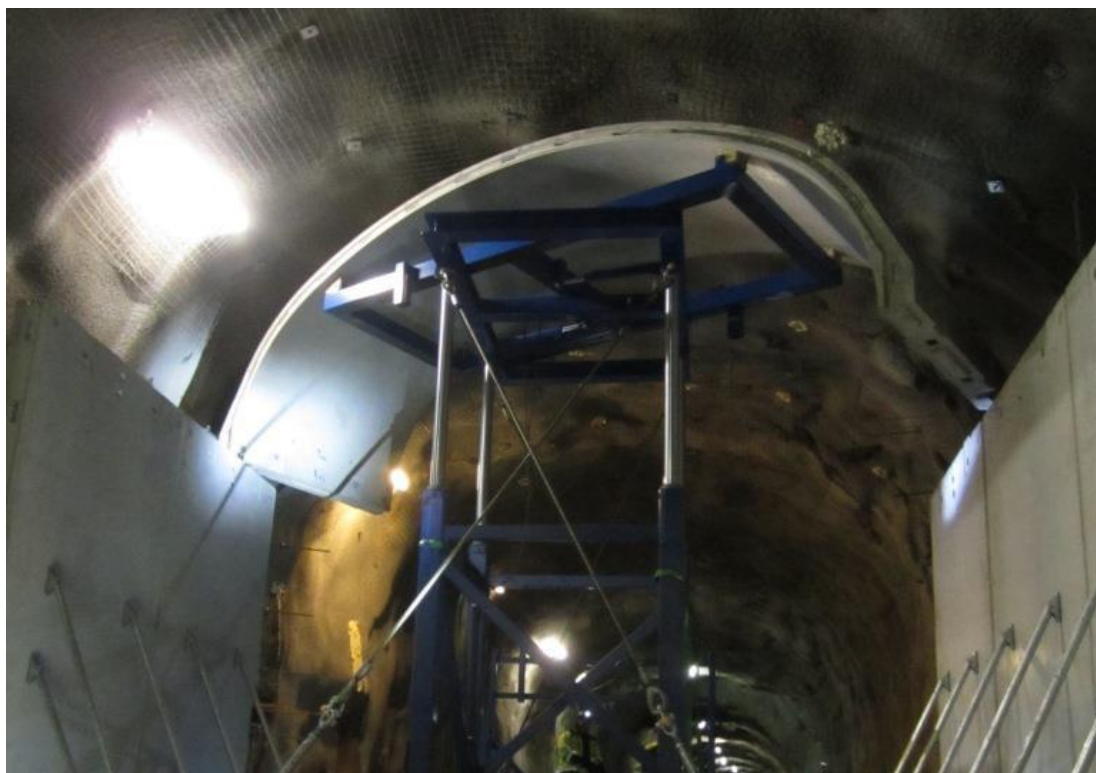


Kuva 25. Ensimmäisen seinäelementin koeasennus. [12.]

Elementtitunnelin rakentaminen aloitetaan pohjalaatalla pohjoisesta ratatunnelista kohdalta 27+684 [10, s. 4]. Pohjalaatat valetaan noin 30 m pituisina valuina. Pohjalaatasta valetaan aluksi pelkkä laattaosuus, jonka jälkeen jälkivaluna 850 mm korkeat seinämät. Pohjalaatta on mitoitettu kestäämään tunnelin käytöstä aiheutuvat rasitukset, mutta sen

tulee kestää myös asennusaikaiset kuormat. Asennusaikana pohjalaattaa kuormittaa muun muassa betonin kuljetus- ja pumppuauto sekä elementtien nosto- ja kuljetuskalusto. Suunnitelmissa on todettu, että pohjalaatta kestää sekä asennuksen, että käytön aikaiset kuormat.

Seinäelementit asennetaan pohjalaatan päälle tietyssä järjestyksessä. Tunnelin etelän puoleisen seinän elementit asennetaan paikoilleen seuraavaan paikallavaluosuuteen, esim. yhdystunneliin tai palopostisyvennykseen, asti. Elementtejä asennetaan siinä järjestyksessä, että paikallavalurakenteiden tekemiseen jää tarpeeksi aikaa. Näin työmaa etenee tasaisesti eikä asennuksessa synny viivästyksiä elementtien ja paikallavalurakenteiden yhtymäkohdissa. Elementit kiinnitetään kiinnitysosilla pohjalaattaan ja tuetaan asennusajaksi vinotuilla. Seinäelementtien pystysuoruus tarkastetaan tarvittaessa pystylaserilla ja teodoliitilla. Vinotukien väliin on jätävä ratalinjan keskeisesti minimissään 3 000 mm vapaata tilaa. Pohjoisen tunnelin seinälle asennetaan seinäelementtejä vain rajallinen määrä kerrallaan. Kaarielementit asennetaan vastapuolen seinäelementtien asennuksen jälkeen, jotta asennusaikainen tuenta saadaan mahdollisimman lyhytaikaiseksi. Näin vain toinen puoli tunnelin elementeistä on pitkältä osuudelta tuettu, jolloin työkoneet mahtuvat liikkumaan. [1; 6; 9.]



Kuva 26. Nostolavetti nostaa kaarielementtiä seinäelementtien välissä. [12.]

Suunnittelussa todettiin, että pohjalaatta kestää kuljetus- ja nostokaluston aiheuttamat kuormat ainoastaan laatan keskiosassa. Tästä syystä kaarielementtien siirtäminen kuljetusautolta asennuslavetille voidaan toteuttaa ainoastaan siirtotavalla yksi, jossa ensin kuljetusauto ja asennuslavetti ajavat elementtinosturin eteen eriaikaan. Tapa kaksi, jossa kuljetusauto ja asennuslavetti ajavat rinnakkain nosturin eteen, kiellettiin työmaalla.

Kaarielementit nostetaan paikoilleen alhaaltapäin lavetilla. Halkeamien välttämiseksi, kaarielementit on tuettava noston- ja asennusvaiheen ajaksi elementin reunoista väli-
tuilla. Jos kaarielementeissä havaitaan asennuksen jälkeen liian suuria halkeamia, halkeamat on injektoitava umpeen. [6.]

Kun kaarielementit on nostettu paikoilleen, ne kiinnitetään seinäelementteihin kiinnikeosilla. Seinäelementtien vinotukia säädetään kaarielementtejä asennettaessa, jotta seinä- ja kaarielementtien sijainti saadaan kohdalleen. Kaarielementtejä asennettaessa on myös putoamisvaara. Kaarielementtien asennus- ja juotostöitä tehtäessä on määrätty, että asentajien tulee käyttää turvavaljaita. [9.]



Kuva 27. Ensimmäisen kaarielementin koeasennus seinäelementtien päälle. [12.]

Asennettavan tunneliosuuden elementtien liitoskohdat injektoidaan, kun kaarielementit on saatu paikoilleen. Injektointimassan ja saumavalujen lujuuden kehitystä seurataan lämpötilan mittauksilla. Injektointimassan ja juotosmassan saavutettua sille asetettu lujuus, poistetaan asennettavan tunneliosuuden elementtien asennusaikainen tuenta. Vinotukien poistamisen jälkeen on taas mahdollista aloittaa uuden tunneliosuuden seinäelementtien asentaminen.

Portaittainen elementtien asentaminen mahdollistaa työkoneiden vaatiman liikuntatilan ja -ohitukset. Työmaalle ei myöskään aiheudu turhaa odottamista, koska yhtä aikaa voidaan valaa paikallavalurakenteita sekä asentaa tunnelin toisen sivun seinäelementtejä. Lisäksi varmistetaan, ettei liitosten injektointi vaurioidu elementtejä asennettaessa. [6; 9.]

4.2.7 Toteutusvaiheen ongelmien ratkaisu

Kun Kehärata-projekti aloitettiin, ei vielä tiedetty kalliossa sijaitsevista haitta-aineista. Koko haitta-ainealueen suunnittelu on Kehäradan toteutusvaiheessa havaittujen ongelmien ratkaisua.

Usein toteutusvaiheessa huomataan vielä ongelmia, joita suunnitteluvaiheessa ei ole osattu tai kyetty ottamaan huomioon. Ongelmat voivat johtua ympäristöstä, logistiikasta, materiaalien toimimattomuudesta, suunnittelu-, rakennus- tai mittavirheestä jne. Usein työnaikainen suunnittelu jatkuukin vielä koko toteutusvaiheen ajan.

Betonielementtirakenteista tunnelia suunniteltaessa ja rakennettaessa on tiettyjä tyypillisiä toteutusvaiheen ongelmakohtia. Ensimmäinen riskikohta tunnelirakentamisessa on rajallinen tila. Materiaalin kuljetus tunneliin ja tunnelissa tulee suunnitella hyvin, jotta se toimii. Elementtien kuljetuksia ja asennuksia varten on tehty asennussuunnitelma, jossa eri ongelmatekijät on otettu huomioon. Tunnelin kalliolouhinta on eniten työmaan tilaa rajoittava tekijä. Tästä syystä koko haitta-ainealueelle on tehty lisälouhinta.

Vaikka piirustusten mittamaailma pyritään suunnittelemaan mahdollisimman tarkkaan, ei se välttämättä aina vastaa todellisuutta. Tämän takia elementtitunnelissa on tärkeää ottaa huomioon mittatoleranssit. Pitkää elementtitunnelia rakennettaessa on mahdollista, että asennuksessa tulee teoreettiseen suunnitelmaan nähden mittapoikkeamia, joi-

den vuoksi elementit eivät sovi suunnitelluille paikoilleen. Asennuksen tässä vaiheessa työmaa ei ollut vielä huomannut ongelmia mittamaailman kanssa [3.]

Elementtien liitokset ja niiden injektointi on eräs elementtitunnelin vaikeimmista osuuksista. Liitosten asennustoleranssit ovat huomattavasti elementtejä pienemmät. Normaalia tunneliosuutta asennettaessa työmaa oli todennut liitokset ja kiinnitysosat hyvin toimiviksi. Kaarielementtien saumaraudoitus oli todettu hankalaksi taivuttaa ja asentaa vajerrilenkkien väliin. Kaarielementtien saumaraudoitus toteutetaan samalla tavalla kuin seinäelementin. Urakoitsija oli kuitenkin sitä mieltä, että kaarielementit on mahdollista toteuttaa suunnitellulla tavalla. Injektoinnin onnistumista on hankala työmaalla varmistaa ilman rakenteiden rikkomista. Ennen kiinnitysosien asentamista työmaan tulee varmistaa liitossyvennyksien ja injektointiletkujen puhtaus. [3.]

5 Asennuksen vaikutus elementtien suunnitteluun

Ennen elementtien ja kiinnitysosien sarjatuotannon aloittamista on tärkeää tehdä koe-asennukset ja varmistaa niiden toimivuus. Jos koeasennuksissa havaitaan vikoja tai puutteita, on tarvetta lisäsuunnittelulle. Koeasennuksissa on huomioitava monia eri asennusvaiheita. Jo elementtien kuljetus- ja nostovaiheessa saatetaan havaita puutteita, joiden vuoksi vaaditaan lisäsuunnittelua.

Tässä vaiheessa elementtitunnelista on toteutettu vain normaalia tunneliosuutta. Leveän tunneliosuuden elementtejä ei ole vielä valmistettu eikä niihin tulevia kiinnitysosia varmistettu lopullisesti. Leveän tunneliosuuden kaksiosaiset kaarielementit ovat huomattavasti yksiosaisia vaikeampi kuljettaa ja asentaa. Jos leveän tunneliosuuden koeasennuksissa havaitaan vikoja tai puutteita, joudutaan mahdollisesti tekemään lisäsuunnitelmia.

Mahdollisten suunnitelmien yhteydessä päivitetään usein myös asennusohje ja asennuspiirustuksista tehdään päivitetty revisiot. Koeasennukset on tehtävä riittävän aikaisessa vaiheessa, jotta työmaa ei viivästyisi, jos rakenteissa havaitaan puutteita. Päivitetty tieto ja uudet piirustukset on myös saatava mahdollisimman nopeasti elementtien ja kiinnikkeiden valmistajille. Asennuksen etenemisestä on pidettävä riittävän usein tilannekatsauksia sekä mahdolliset viat ja puutteet on kirjattava ylös ja toimitettava suunnittelijalle.

6 Tulokset

Elementtirakenteista tunnelia suunniteltaessa tulee ottaa huomioon tiettyjä asioita, joita normaalirakenteisessa junatunnelissa ei tarvitse huomioida. Normaalissa junatunnelirakenteessa kallioulouhinnan päälle ruiskutetaan ruiskubetoni. Tunnelin suuaukon rakenteissa ruiskubetonin ja kallioulouhinnan väliin tulee noin 100 mm paksuinen eriste-kerros. Elementtirakenteinen tunneli aiheuttaa paljon lisätyötä niin työmaalla, kun suunnittelussakin. Lisäksi Suomessa on vähän kokemusta elementeistä rakennetuista tunneleista.

Kehäradan haitta-ainealue päätettiin toteuttaa elementtirakenteisena, jotta suoja-membraanin asennus olisi mahdollisimman helppo toteuttaa. Koko tunnelirakenne tuli saada kauttaaltaan suojattua haitta-aineilta. Toinen vaihtoehto olisi ollut toteuttaa tunneli paikallavaluna.

Tunneleissa vallitsevat asennusolosuhteet ovat hyvin vakaita. Kuitenkin elementtitunnelia suunniteltaessa tulee varmistaa, että elementtien kuljetuksille ja nostoille on riittävästi tilaa. Elementtitunnelia rakennettaessa normaalista poikkeavia työkoneita ovat elementtien kuljetus- ja nostokalusto. Lisäksi elementtitunnelin sisällä asennustila on normaalia pienempi. Elementtien kuljetus- ja nostokalustoa käytetään normaalisti ulkona, jolloin tilankäyttö on helpompi suunnitella.

Radan pohjatyöt ovat aina junaliikenteen vuoksi merkittävä. Louhittu kalliotunnelin pohja on hyvin epätasainen, jolloin pohjan täyttötöiden merkitys on suuri. Ratalinja vaihtelee junatunnelissa sekä pysty että vaakasuunnassa. Elementtitunnelia suunniteltaessa on otettava huomioon pohjan tasaisuuden lisäksi radan geometrian vaikutus. Ratalinjan muutokset näkyvät elementtien saumojen mittapoikkeamina, jotka tulee ottaa huomioon suunniteltaessa elementtien ja liitosten asennustoleransseja. Haitta-ainealueella elementtien sijainti on mitoitettu seinäelementtien alareunan mukaan. Tällöin mittapoikkeamat näkyvät seinäelementtien yläsaumoissa ja kaarielementtien sijainnissa. Elementtien saumavalut tulee suunnitella riittävän suuriksi, jotta elementit ja liitokset on mahdollista asentaa. Elementtien sijainnin tarkalla suunnittelulla voidaan välttää radan geometrian aiheuttamat asennusongelmat.

Elementtitunnelia suunniteltaessa tulee myös huomioida eri rakenteiden yhteensovittaminen. Haitta-ainealueen elementtitunnelissa pohjalaatta ja seinäelementtien sokkeli

on toteutettu paikallavaluna. Paikallavalurakenteiden mittatoleranssit ovat elementtejä suuremmat. Toleranssit tulee ottaa huomioon suunniteltaessa eri rakenteiden saumoja ja liitoksia. Paikallavalurakenteet on tehtävä niin, että elementit on mahdollista kiinnittää niihin. Kiinnitysosat on suunniteltava niin, että asennusvarat riittävät sekä elementeissä, että paikallavalu rakenteissa. Lisäksi kiinnitysosien vaatimat syvennykset, asennusreiät ja injektointijärjestelmä on suunniteltava niin, että se on mahdollista toteuttaa paikallavalurakenteeseen.

Taloudellisesti on kannattavampaa, mitä enemmän tunnelirakenteessa on mahdollista käyttää ja toistaa samoja elementtejä ja samoja kiinnitysosia. Mahdollisimman moni elementeistä kannattaa suunnitella vakiomittaisiksi. Lisäksi kiinnitysosat kannattaa suunnitella niin, että niitä pystytään käyttämään mahdollisimman monessa eri paikassa. Suunnittelussa on huomioitava myös eri betonirakenteille ja liitoksille asetetut vaatimukset, kuten paloluokka, suunniteltukäyttöikä ja materiaalilujuudet.

Lisäksi suunnittelussa tulee huomioida epätavalliset olosuhteet, kuten tässä haitta-aineiden vaikutus. Haitta-ainealueella suunniteltiin elementtitunnelin lisäksi, miten suojaembraanin asennus toteutetaan. Uusista rakenteista ja materiaaleista kannattaa tehdä koeasennukset. Koeasennuksissa varmistetaan asennettavuus ja sopivuus käyttötarkoitukseen.

7 Yhteenveto

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin betonielementtirakenteisen tunnelin suunnittelussa ja asennuksessa huomioitavia tekijöitä. Työssä analysoitiin myös, mitkä tekijät vaikuttavat rakenteiden valintaa ja miksi tässä projektissa oli päädytty tiettyihin ratkaisuihin. Lisäksi tutkittiin elementtitunnelin rakentamiseen liittyviä ongelmia ja niiden ratkaisuja. Insinöörityön mallikohteenä oli Kehäradan haitta-ainealueen betonielementtirakenteinen tunneli.

Työ aloitettiin tutustumalla kohteen suunnitteluun, toteutuspiirustuksiin ja muuhun suunnittelumateriaaliin. Työn aikana pidettiin suunnittelijoiden kesken useita tilannekatsauksia sekä haastateltiin suunnittelijoita. Haastatteluiden tarkoituksena oli kartoittaa suunnittelun eri vaiheita ja etsiä vastauksia muun muassa seuraaville kysymyksille: Mikä oli kohteen alkutilanne? Mitä vaihtoehtoja haitta-aineiden suojaamiselle oli? Miksi

päädyttiin betonielementtirakenteiseen tunneliin? Mitkä tekijät olivat vaikuttaneet eri ongelmien ratkaisuun? Lisäksi vierailtiin työmaalla, jossa tutustuttiin kohteen tämän hetkiseen tilanteeseen. Työmaakäynnin yhteydessä tehtiin haastatteluja, joiden tarkoituksena oli selvittää työmaalla havaittuja ongelmia.

Työn tuloksena saatiin laaja selvitys siitä, mitä betonielementtirakenteista tunnelia suunniteltaessa tulee huomioida. Työssä kartoitettiin elementtitunnelin ongelmakohdat ja analysointiin niiden ratkaisuja. Koska työmaa ei edennyt opinnäytetyön aikana kovin pitkälle, asennusaikaisten ongelmien ratkaisu ja asennusaikaisen suunnittelun tutkiminen jäi oletettua vähäisemmälle. Työmaan edetessä saattaa ilmetä asennusaikaisia ongelmia, joita tässä työssä ei otettu huomioon. Muilta osin työtä saavutettiin työlle asetetut tavoitteet.

Lähteet

- 1 Pöyry Finland Oy. 2008 - 2013. Kehäradan toteutuspiirustukset.
- 2 Glykolisuojausten yleiskuvaus. 2012. Liikennevirasto.
- 3 Karjalainen, Seppo. Heinäaho, Veli-Pekka. Räisänen, Olli. SRV Rakennus Oy. Työmaakäynti ja haastattelut 28.03.2013.
- 4 Nummelin, Markku. 2012. Kehärata; Rakennussuunnitelma; Suunnitteluperusteet. Liikennevirasto.
- 5 Kaydamov, Metodi. Projektipäällikkö, Siltojen ja taitorakenteiden suunnittelu, Pöyry Finland Oy, Vantaa. Keskustelu 12.01.2013.
- 6 Lassila, Kari. Projektipäällikkö, Toimisto- ja liikennetunnelit, Pöyry Finland Oy, Vantaa. Keskustelut 12.01.2013 ja 8.2.2013.
- 7 Karjalainen, Seppo (SRV Rakennus Oy), Kaydamov, Metodi (Pöyry Finland Oy) ja Halonen, Laura (Mapei Oy). s-posti keskustelu 21.1.2012 - 7.2.2013.
- 8 Pöyry Finland Oy, WSP Finland Oy, VR-Track Oy ja VTT. 2011. Lentoaseman urakkaosuus; Glykoliratkaisun yleissuunnitelmavaihe. Kehärata.
- 9 Elementtiasennusliike H. Tourunen Oy. 2013. Elementtiasennussuunnitelma.
- 10 Peltonen, Jukka-Pekka (SRV Rakennus Oy), Kaydamov, Metodi (Pöyry Finland Oy). s-posti keskustelu 4-5.2.2013.
- 11 Havator Engineering. 2012. Kaarielementin kuljetus –piirustus.
- 12 Heinäaho, Veli-Pekka. SRV Rakennus Oy. Seinäelementtien asennuskuvat 07.03.2013, kaarielementtien asennuskuvat 13.03.2013.
- 13 Kehärata. 2013. Verkkodokumentti. Liikennevirasto.
<http://www.flickr.com/photos/liikennevirasto/8005810313/in/set-72157629981211024>. Luettu 5.4.2013.
- 14 Polyeteeni. 2013. Verkkodokumentti. Valuatlas.
http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PE_FI.pdf. Luettu 5.4.2013.
- 15 Teodoliitti. 2013. Verkkodokumentti. Wikipedia.
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Teodoliitti> . Luettu 12.4.2013.